



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



**DISSERTAÇÃO**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO E**  
**ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE BANANA**  
**(*Musa acuminata* L.)**

**JUCILENE DO NASCIMENTO**

**Campina Grande - Paraíba**  
**AGOSTO - 2002**

**JUCILENE DO NASCIMENTO**

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE BANANA**  
*(Musa acuminata L.)*

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**Campina Grande – Paraíba**

**AGOSTO – 2002**

---

**JUCILENE DO NASCIMENTO**

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE BANANA<sup>e</sup>**  
**(*Musa acuminata* L.)**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de *Mestre*.**

---

**Área de concentração: Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas**

**Orientadores: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia – DEAg/CCT/UFCG**  
**Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida - DEAg/CCT/UFCG**

**Campina Grande – Paraíba**

**AGOSTO – 2002**

---



N244e Nascimento, Jucilene do  
Estudo da cinetica de secagem de banana (*Musa acuminata* L.) / Jucilene do Nascimento. - Campina Grande, 2002.  
65 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) -  
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciencias  
e Tecnologia.

1. Engenharia Agricola - Secagem de Frutas 2. Frutas -  
Secagem 3. Isotermas de Dessorcao 4. Bananas - Secagem 5.  
Dissertacao I. Gouveia, Josivanda Palmeira Gomes de II.  
Almeida, Francisco de Assis Cardoso III. Universidade  
Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 631.6(043)



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

JUCILENE DO NASCIMENTO

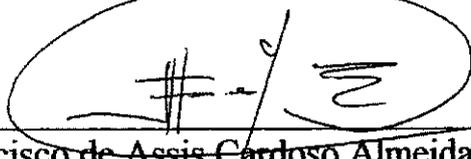
Título: "Estudo da cinética de secagem de banana (*Musa acuminata*)".

BANCA EXAMINADORA

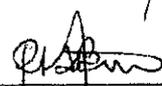
PARECER

  
Dra. Josivanda P. Gomes de Gouveia-Orientadora

Aprovada

  
Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida-Orientador

Aprovada

  
Dra. Riselane de Lucena A. Bruno-Examinadora

Aprovada

  
Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva-Examinador

Aprovada

AGOSTO - 2002

*Dedico este Trabalho*

*A Deus*

*Aos meus pais, irmãos, avós, tios, sobrinhas e primos*

*Ao namorado e amigos*

## AGRADECIMENTOS

A Deus que além do milagre da vida proporcionou-me meus pais Manoel Luis do Nascimento e Maria José do Nascimento, que sempre lutaram pela minha educação com ensinamentos de fé, coragem, força e determinação, conduzindo-me a concretização dos meus objetivos.

Aos meus irmãos Élide, Edna, Manoel, Luciene e Érica, Também a Cecília, Bela, Oberval, Alexandre, Carolina e Maria Luisa, que em todos os momentos me incentivaram.

A Djailton por seu amor e companheirismo no decorrer deste trabalho.

Aos Professores Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia e Francisco de Assis Cardoso Almeida, pela amizade, valiosas orientações e sugestões prestadas.

A Coordenação pela oportunidade de realizar este curso, em especial à Rivanilda.

A Professora Odelsia Sánches pelo apoio despendido na realização deste trabalho.

Aos professores Riselane Lucena Alcântara Bruno e Flávio Luíz Honorato da Silva.

A Eliana e Família pela amizade que sempre tiveram comigo.

Aos amigos, Patrícia, Edimir, Robert, Milene, Gilvanete, Manassés, Raimundo, Claudécia, Sheylla, Lílian, Nayara, Aécio, Cláudio, Cláudio Santana, Zilmar e Robson.

Aos amigos de sempre Ellys, Sílvia, Henrique, Andréa, Alfredina, Kleber e Gerardus.

A professora Vera Lúcia da Universidade Estadual - UEPB, pelo incentivo para o ingresso no mestrado.

A todos os meus sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

Páginas

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

SUMMARY

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1.    A bananeira.....	16
2.2.    Banana-passa.....	17
2.3.    Secagem.....	18
2.4.    Taxa de secagem.....	21
2.4.1.    Secagem à taxa constante.....	22
2.4.2.    Secagem à taxa decrescente.....	22
2.5.    Secador de leito fixo.....	24
2.6.    Isotermas de sorção.....	25
2.7.    Modelos matemáticos para ajuste das isotermas.....	28
2.8.    Caracterização físico-química.....	29
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1.    Matéria-prima.....	31
3.2.    Isotermas de dessorção.....	31
3.3.    Ajuste dos modelos.....	33
3.4.    Cinética de secagem.....	36
3.5.    Modelo difusional.....	37
3.6.    Caracterização físico-química da banana.....	38
3.6.1.    pH.....	38
3.6.2.    Cinzas.....	38
3.6.3.    Sólidos solúveis (°Brix).....	39
3.6.4.    Umidade.....	39

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>40</b>
4.1. Isotermas de dessorção .....	40
4.2. Cinética de secagem.....	45
4.3. Modelo difusional.....	48
4.4. Caracterização físico-química.....	51
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>
<b>6. SUGESTÕES.....</b>	<b>53</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>54</b>
<b>8. APÊNDICE A.....</b>	<b>59</b>
<b>9. APÊNDICE B.....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figuras</b>	<b>Páginas</b>
1. Mecanismo de atividade de água.....	32
2. Secador de leito fixo.....	36
3. Isotermas de dessorção da polpa de banana prata no estágio maduro para três temperaturas ajustadas pelo modelo de GAB.....	44
4. Isotermas de dessorção da polpa de banana prata semiverde para três temperaturas ajustadas pelo modelo de GAB.....	45
5. Cinética de secagem de banana no estágio maduro para quatro temperaturas e duas velocidades do ar de secagem.....	46
6. Cinética de secagem de banana semiverde para quatro temperaturas e duas velocidades do ar de secagem.....	46
7. Frutos da banana no estágio maduro após secagem.....	64
8. Frutos da banana semiverde após secagem.....	64

## LISTA DE TABELAS

	<b>Páginas</b>
<b>Tabelas</b>	
1 Composição da banana madura.....	17
2 Valores experimentais de atividade de água e umidade de equilíbrio de banana prata nos estádios maduro e semiverde para as temperaturas de 20, 30 e 40 °C.....	40
3 Parâmetros de ajustes das isotermas de dessecção de banana nos estádios maduro e semiverde para os diferentes modelos matemáticos estudados.....	42
4 Valores de difusividade efetiva de banana prata no estádio maduro estimada pelo modelo difusional, nas temperaturas 60, 80, 100 e 120 °C ....	50
5 Valores de difusividade efetiva de banana prata semiverde estimada pelo modelo difusional, nas temperaturas 60, 80, 100 e 120 °C .....	50
6 Determinações físico-químicas da polpa de banana prata no estádio maduro e semiverde.....	51
7 Cinética de secagem de banana prata no estádio maduro para a velocidade do ar de secagem de 1,0 m. s <sup>-1</sup> .....	60
8 Cinética de secagem de banana prata no estádio maduro para a velocidade do ar de secagem de 2,0 m. s <sup>-1</sup> .....	61
9 Cinética de secagem de banana prata semiverde para a velocidade do ar de secagem de 1,0 m. s <sup>-1</sup> .....	62
10 Cinética de secagem de banana prata semiverde para a velocidade do ar de secagem de 2,0 m. s <sup>-1</sup> .....	63

## RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo estudar a secagem de banana nos estádios maduro e semiverde (*Musa acuminata* L.) da variedade prata, em um secador de leito fixo com as bananas expostas em camadas de 0,5 cm de espessura as temperaturas de 60, 80, 100 e 120 °C e velocidade do ar de secagem de 1,0 e 2,0 m.s<sup>-1</sup> e as isotermas de dessorção para as temperaturas de 20, 30 e 40 °C mediante o método gravimétrico estático na faixa de umidade relativa de 0,480 a 0,81%. Estudou-se, também, alguns dos seus componentes físico-químicos. Os dados experimentais obtidos foram ajustados por regressão não linear pelos modelos de BET, GAB, Halsey e Oswin, escolhendo-se o melhor, mediante o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo ( $E$ ). De acordo com a análise dos dados a cinética de secagem da polpa nas duas maturações ocorre no período de taxa decrescente e que a velocidade do ar de secagem influencia no processo de secagem da banana no estádio maduro as temperaturas de 60, 80 e 100 e 120 °C e para a banana semiverde as temperaturas de 100 e 120 °C, sendo, no entanto, a temperatura, o fator de maior influência; os modelos que apresentaram menor erro relativo ( $E$ ) e o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram o de Oswin e GAB, respectivamente, no entanto, o de GAB foi escolhido por ser triparamétrico o que permite um melhor ajuste dos dados até a atividade de água de 0,9. Os componentes físico-químicos avaliados não foram grandemente influenciados pelos dois estádios de maturação do fruto (maduro e semiverde) tendo apresentado um pH de 4,23 e 4,41, cinzas 0,71 e 0,79 %, sólidos solúveis 24,2 e 13,1 % e umidade 68,81 e 67,24 %, respectivamente.

## RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado el efecto del secado de plátanos maduro y medio verde (*Musa acuminata L.*), variedad plata, en secador de lecho fijo con los plátanos expuestos en camadas de 0,5 cm de espesura a temperaturas de 60, 80, 100 e 120 °C y velocidad del aire de secamiento de 1,0 y 2,0 m.s<sup>-1</sup> y las isotermas de desorción para las temperaturas de 20, 30 y 40 °C y humedad relativa de 0,48 a 0,81 % empleando el método gravimétrico estático. Se ha estudiado, también, algunos de sus componentes fisico-químicos. Los datos obtenidos fueran ajustados por regresión no lineal, empleando de BET, GAB, Halsey y Oswin, eligiéndose el mejor por medio del coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y error medio relativo (E). Mediante los datos, se tienen que la cinética de secado de la pulpa, en los dos estadio de madurez, ocurre en el período de tasa decreciente y que la velocidad del aire del secado influencia en el proceso de secamiento del plátano maduro a los temperaturas de 60, 80, 100 y 120 °C y para el plátano medio verde a temperaturas de 100 y 120 °C, siendo, por lo tanto, la temperatura el factor de mayor influencia; los modelos de Oswin y GAB fueran los que presentaran menor error relativo (E) y el mayor coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), respectivamente. Entretanto, se elogió el modelo de GAB por ser triparamétrico, lo que permite un mejor ajuste de los datos hasta la actividad del agua de 0,9. Los componentes fisico-químicos valuados no fueran grandemente influenciados por los dos estadios de maduración del fruto (maduro y medio verde) teniendo presentado un pH de 4,23 y 4,41, cenizas 0,71 y 0,79 %, sólidos solubles 24,2 y 13,1 % y humedad 68,81 y 67,24 % respectivamente.

## **1. Introdução**

A banana (*Musa acuminata* L.) é uma fruta de consumo universal rica em carboidratos e potássio, médio teor em açúcares e vitamina A e baixo em proteínas e vitaminas B e C. É apreciada por pessoas de todas as classes e de qualquer idade, que a consomem in natura, frita, assada, cozida, em calda, em doces caseiros ou em produtos industrializados.

A importância da bananicultura varia de local para local, assim como de país para país. Por vezes, ela é plantada para servir de complemento na alimentação da família (fonte de amido) como receita principal ou complemento na propriedade ou ainda, como fonte de divisas para o país.

Com frequência, seu cultivo é feito em condições ecológicas adversas, mas, em vista da proximidade de um bom mercado consumidor, esta atividade se torna economicamente viável. No Brasil, tem a característica de ser plantada em quase todos os municípios, em maior ou menor quantidade, sendo relacionado como um dos maiores produtores. Mas, apesar de sua posição no *ranking* mundial, enfrenta um grande problema de aproveitamento pós-colheita, a qual é da ordem de 40%, devido, principalmente, as más condições de colheita, processamento e comercialização (Lima, 1999).

Segundo o FIBGE (1992) o crescimento na produção nacional vem sendo registrado ano a ano acompanhado de pequeno aumento na área colhida, o que demonstra ser a bananicultura uma atividade ainda atrativa. O Estado de São Paulo, responsável por cerca de 10 a 13 % da safra nacional, é o maior produtor Brasileiro.

A produção dessa Musaceae é proporcional ao trato que recebe e, também, segundo as condições ecológicas da localidade. É uma planta muito exigente em água, que, em média, constitui quase 90% de seu peso total.

As áreas de produção, assim como os mercados brasileiros, estão passando por modificações bastante acentuadas, por isso, haverá, sempre que se justifique, recomendação específica para uma cultivar ou uma localidade diferente.

Com a necessidade de se ampliar os estudos na área de secagem com essa frutífera, o Departamento de Engenharia Agrícola da UFCG tem desenvolvido pesquisas com vista ao aproveitamento máximo em cada colheita, melhorando a forma e o modo de conservar as suas propriedades organolépticas e nutricionais, mediante o emprego da secagem, que é um processo combinado de transferência de calor e massa, na qual reduz a disponibilidade de água e reduz o crescimento microbiano e as reações químicas e bioquímicas. O aumento da temperatura do material a ser desidratado promove a evaporação da água, enquanto a circulação do ar remove a umidade evaporada.

A secagem tem por objetivo básico assegurar a conservação da fruta por meio da redução do seu teor de água sendo realizada por um processo que utiliza energia térmica para remover parte ou quase a totalidade da água das frutas, sob condições de temperatura, umidade e velocidade do ar cuidadosamente controladas (Villar, 1999).

Pelo fato de ser a banana um material com alta umidade, essa pode perder ou ganhar umidade para o ambiente onde estiver até atingir o equilíbrio. Deste modo, é de suma importância o estudo do equilíbrio higroscópico, uma vez que determina o teor de umidade mínimo que o produto pode atingir sob determinadas condições de secagem.

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo geral estudar experimentalmente a cinética de secagem da banana prata nos estádios maduro e semiverde utilizando um secador de leito fixo e como objetivos específicos:

- analisar o efeito das variáveis operacionais: temperatura (60, 80, 100 e 120 °C) e velocidade (1,0 e 2,0 m.s<sup>-1</sup>) do ar de secagem da banana;
- determinar as isotermas de dessorção para as temperaturas de 20, 30 e 40 °C, utilizando o método estático indireto;
- determinar o coeficiente de difusão para as condições de secagem estabelecidas através da lei de Fick;
- caracterizar a banana prata nos estádios maduro e semiverde por meio de análises físico-químicas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. A bananeira**

A bananeira (*Musa acuminata* L.) tem como origem no Oriente Sul da China ou Indochina. Há informações da sua presença na Índia, Malásia ou Filipinas, há mais de 4000 anos. No Brasil, ela existe desde antes do seu descobrimento. A banana constitui uma fonte importante na alimentação humana pelos valores caloríficos, energéticos e, principalmente, pelo conteúdo mineral e vitamínico que apresenta (Lima e Nebra, 2000).

A banana é fruta de consumo universal, comercializada por dúzia, por quilo e até mesmo por unidade. É rica em carboidratos e potássio, médio teor em açúcares e vitamina A, e baixo em proteínas e vitaminas B e C. A banana é apreciada por pessoas de todas as classes e de qualquer idade, que a consomem in natura, frita, assada, cozida, em calda, em doces caseiros ou em produtos industrializados. A fruta verde é usada in natura com grande sucesso na desidratação infantil, depois de bem homogeneizada no liquidificador; seu tanino, revestindo as paredes intestinais e do tubo digestivo, evita, por ação mecânica, que as células do órgão continuem se desidratando. No meio rural é utilizada, ainda verde, como alimento de animais, depois de cozida, para eliminar o efeito do tanino nos intestinos.

A banana é basicamente composta de água (70%), proteína (1,2%), carboidrato rico em fósforo (27%), sais minerais (cálcio, ferro, cobre, zinco, iodo, manganês e cobalto) e vitaminas como: vitamina A, tiamina, riboflavina, niacina e vitamina C (Villar, 1999).

A Tabela 1 apresenta a composição físico-química da polpa de banana, variedade prata, nos estádios de maturação maduro e semiverde.

**Tabela 1.** Composição da banana madura

Determinações	Banana prata	
	Verde	Madura
Sólidos solúveis (°Brix)	5,4	26,20
pH	5,00	4,40
Tanino (mg/100g)	54,00	55,00
Açúcares redutores (%)	0,89	19,52
Açúcares não redutores(%)	0,57	3,35
Açúcares totais (%)	1,46	22,87
Umidade (%)	88,80	69,95
*Cinzas (%)	-	0,90

FONTE: Bublitz et al. (1980); Carvalho (1981)

Chitarra e Chitarra (1990) apresentaram valores de sólidos solúveis em diferentes estágios de maturação de banana prata verde, de vez e maduro e obtiveram os seguintes valores: 1,5; 8,2 e 20,3 % respectivamente.

## 2.2. Banana-passa

A banana-passa ou banana seca é obtida da secagem da banana madura, apresentando para a banana nanica ou nanição coloração bem escura, consistência firme e sabor pouco persistente da fruta. Caracteriza-se por um elevado teor de açúcares podendo ser classificada entre os produtos de elevado valor alimentício, facilmente assimilável e constituindo uma fonte de energia ativa. Seu valor energético pode ser comparado ao das tâmaras (316 cal/100g) e ao dos figos (300 cal/100g), sendo que 125 g de banana seca, por dia, bastariam para cobrir um quarto das necessidades alimentícias de uma criança de dez anos, em

valor energético, glicídios, magnésio e vitamina PP, prótidos de origem vegetal, potássio, ferro e magnésio. Cobriria, aproximadamente, um oitavo das necessidades em fósforo, cloro, zinco e vitamina C (Dantas e Soares Filho,1999).

A banana seca pode ser armazenada satisfatoriamente por alguns anos sem adição de conservantes. Presume-se ser devido ao elevado teor de açúcares, que excede 50%. A utilização de técnicas adequadas de secagem pode levar à obtenção de um produto de coloração clara, consistência macia e de sabor e aroma agradável (Travaglini et al., 1993). Os autores afirmam que, em geral a banana Brasileira seca é encontrada tradicionalmente no mercado interno, produzida sem padrões definidos de qualidade quanto à coloração, textura, sabor e aroma.

### **2.3. Secagem**

A secagem é importante, pois visa preparar o produto para a armazenagem. Entretanto, se mal conduzida, poderá prejudicar a qualidade comercial do produto antes mesmo da armazenagem, ou, por outro lado, acelerar o processo de deterioração durante a armazenagem.

A palavra secagem é frequentemente usada para descrever processos através dos quais haverá a remoção de água do material. É, pois, a secagem, sob o aspecto físico, um processo simultâneo de calor e massa que ocorre num meio capilar-poroso sempre que o meio contiver umidade e estiver sujeito a qualquer ou a todos gradientes de concentração: pressão parcial de vapor, temperatura, pressão total e campos de força externa.

Quando o produto é colocado em contato com o ar de secagem, ocorrerá uma transferência de calor do ar para o produto devido à diferença de temperatura existente entre eles, e, simultaneamente a diferença de pressão parcial de vapor de água entre o ar e a superfície do produto ocasionará uma transferência de massa do produto para o ar. Parte do calor que chega ao produto é utilizado para vaporizar a água, assim, a transferência de massa se faz na forma de vapor de água (Gouveia et al., 1999; Araújo et al., 2001; Moura et al., 2001).

Schirmer et al. (1996) investigaram experimentalmente o desempenho do secador solar tipo túnel para secagem de bananas. Segundo os autores, a temperatura do ar de secagem do coletor solar variou de 40 a 65 °C durante a secagem, dependendo das condições climáticas e da hora do dia, sendo que o processo demorou de 3 a 5 dias em comparação aos 5 a 7 dias necessários para a secagem solar com ar natural. Aliado a esta vantagem, o produto apresentou alta qualidade em sabor, cor e textura.

Queiroz e Nebra (1995) abordaram a modelagem do processo de secagem de banana *Musa acuminata* sub grupo Cavendish, baseada na teoria da difusão líquida, com ênfase ao tipo de condições de contorno considerada para a superfície da fruta. Os dados foram obtidos de testes experimentais sob condições controladas tais como temperatura do ar e umidade relativa. As bananas foram representadas por um cilindro infinito e coeficiente de difusão considerado constante. Duas condições de contorno foram investigadas para a superfície da fruta: conteúdo de umidade de equilíbrio e condições de contorno conectivas. Os resultados mostraram que o modelo convectivo descreveu muito bem a cinética de secagem experimental. Em outro trabalho, Queiroz e Nebra (1996) estudaram a secagem de bananas inteiras, variedade nanicão, na faixa de temperatura entre 29,9 e 68,9 °C, propondo um modelo cinético que inclui o efeito do encolhimento.

Altemani citado por Villar (1999) relata um estudo experimental de coletores solares planos de convecção natural. O sistema desenvolvido foi aplicado para secagem de frutas, particularmente bananas inteiras, em metades cortadas longitudinalmente e em rodela (1cm de espessura). Testes experimentais foram realizados com temperaturas do ar na entrada da câmara variando de 30 a 67 °C. Segundo o autor, a influência da geometria na taxa de secagem é nítida, sendo que as bananas cortadas apresentaram uma taxa de secagem sensivelmente maior do que às apresentadas para as bananas inteiras.

Kiranoudis et al. (1997) ao estudarem a cinética de secagem de quatro frutas (maçã, pera, kiwi e banana) pela introdução de um parâmetro empírico no modelo de transferência de massa, envolvendo um parâmetro característico (constante de secagem), como uma função das variáveis do processo. O modelo foi testado com dados produzidos num secador de laboratórios, usando uma análise de regressão não linear. Experimentos para determinar a influência das variáveis do processo sobre a cinética de secagem foram realizados. As variáveis levadas em consideração foram as dimensões características das amostras e a temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem. Os experimentos foram conduzidos em três níveis de dimensões características das amostras (10, 20 e 28 mm), em três níveis de temperatura do ar (50, 60 e 70 °C), em três níveis de velocidade do ar (1,2 e 4,5 m.s<sup>-1</sup>) e em dois níveis de umidade relativa do ar (15 e 40 %). Neste trabalho foram apresentados resultados do teor de umidade de equilíbrio para várias condições de secagem, bem como parâmetros da equação GAB, que foram ajustados a partir de dados experimentais.

Krokida et al. (1998) estudaram a cinética de secagem e as variações de cor de algumas frutas (maçã e banana) e vegetais (cenoura e batata) durante o processo. Neste trabalho, um estudo minucioso sobre o efeito das condições e métodos de secagem nas variações de cor da maçã, banana, cenoura e batata foram investigados.

Desenvolvendo vários modelos matemáticos bidimensionais analíticos e numéricos para simular o fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos, Lima e Nebra (2000) aplicaram para a secagem de banana, variedade nanicao. Na formulação numérica, o método de volume finitos, usando uma malha regular, é explorado para discretizar a equação de difusão, considerando o fenômeno com ou sem encolhimento, com ou sem temperatura, com ou sem transporte simultâneo de umidade e calor. O conjunto de equações lineares é resolvido interativamente pelo método de Gauss-Seidel, usando condições de fronteira de equilíbrio ou conectiva e coeficiente de difusão constante ou variável.

#### **2.4. Taxa de secagem**

Brooker et al. (1992) afirmam que há pelo menos, dois períodos distintos de secagem de um produto agrícola: o de taxa de secagem constante, que normalmente ocorre em produto com mais de 70 % de umidade, e o período de taxa de secagem decrescente. O teor de umidade que separa estes dois períodos (teor de umidade crítico) depende da forma do produto e das condições de secagem.

Conforme Prado et al. (2000) a evolução das transferências simultâneas de calor e de massa, no curso da operação de secagem, faz com que esta seja dividida, esquematicamente, em três períodos de secagem: período 0 ou período de se entrar em regime operacional; período 1 ou período de secagem à taxa constante; e período 2 ou período de secagem a taxa decrescente. No período zero, o produto é geralmente mais frio que o ar, e a pressão parcial de vapor da água da superfície do produto é débil, e, por consequência a transferência de massa e a velocidade de secagem também o são. O calor chegando em excesso acarreta uma elevação da temperatura do produto, ocorrendo um aumento de pressão e da velocidade de secagem.

Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa.

#### **2.4.1. Secagem à taxa constante**

No período de secagem à taxa constante são as transferências de calor e massa na interface ar-produto que governam e fixam a velocidade de secagem. O produto permanece com a superfície coberta por uma camada de líquido, constituindo umidade não ligada, e com temperatura de bulbo úmido do ar. O líquido absorve calor e se vaporiza a uma taxa constante. Nesse período, a migração de umidade do interior para a superfície compensa a perda por vaporização; a secagem se comporta como a evaporação de uma superfície líquida. Para alimentos de uma maneira geral, o período de taxa de secagem constante pode ser observado quando o potencial de secagem do ar é muito baixo ou o teor de umidade do período é muito alto (Chirife, 1982).

#### **2.4.2. Secagem à taxa decrescente**

O período de secagem a taxa decrescente é o mais observado em produtos agrícolas. Com o prosseguimento da secagem, a migração da água para a superfície diminui, não mais compensando a vaporização superficial. A superfície, portanto, deixa de ficar saturada, causando redução na pressão de vapor superficial e da taxa de secagem. As forças motrizes de transporte são as forças capilares e de difusão, que atuam de acordo com as propriedades do material a ser seco. Assim, em um campo de umidade mais reduzido, o qual depende da natureza da substância e das condições de secagem, a taxa de secagem é influenciada fortemente pelas leis de migração da umidade no interior dos materiais sólidos. O período de

taxa decrescente pode ser bem mais dilatado que o período de taxa constante, embora a remoção de umidade seja muito menor (Moura et al., 2001).

Segundo Park (1987) para a maioria dos materiais granulares e sólidos porosos, de modo geral, o período de secagem pode ser subdividido em dois regimes: 1 - a secagem ocorre em uma zona de superfície insaturada, isto é, não existe continuidade de água em toda a superfície de evaporação. A superfície de evaporação diminui, e, portanto, a taxa total de evaporação da superfície decresce – é a zona de superfície insaturada; 2 – a região de vaporização localiza-se no interior do material e a razão de secagem é controlada pelo movimento interno de água, sendo essa etapa pouco influenciada pelas condições ambientais – é a zona de controle interno. Para a primeira fase do período de secagem à taxa decrescente, os principais mecanismos de transportes sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor. Um mecanismo não necessariamente exclui os outros, que pode ocorrer simultaneamente. Na segunda fase deste período, onde a umidade de equilíbrio está abaixo da saturação, a difusão da fase de vapor é provavelmente o mecanismo dominante.

As mais importantes teorias de secagem são aquelas que tentam explicar os fenômenos físicos internos, principalmente para materiais biológicos. Park (1987), apresenta a teoria que explica o comportamento da secagem como: teoria difusional utilizando a 2ª lei de Fick. A secagem de alimentos é analisada através de curvas de secagem, apresentadas na forma de umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo da taxa de secagem (N) em função da umidade absoluta (X) e do adimensional de água livre, ( $(X-X_e)/(X_0-X_e)$ ), em função do tempo (Gabas et al., 1995; Park, 1987; Gouveia et al., 1999a; Prado et al., 2000). Considerando uma distribuição de umidade inicial uniforme e em ausência de quaisquer resistências térmicas a solução analítica da Lei de Fick para uma placa plana infinita é dada na forma de séries infinitas (Brooker et al., 1992; Crank, 1975).

Krokida et al. (2000) estudando a desidratação de maçã verificaram para este produto que a cinética de secagem foi grandemente afetada pelo tamanho das amostras e pela temperatura do ar de secagem. Um modo empírico de transferência de massa, envolvendo uma ampla escala de dimensões das amostras e condições do ar de secagem (temperatura, umidade relativa e velocidade superficial), para maçã, pêra, kiwi e banana, foi estudado por Kiranoudis et al. (1997) que estabeleceram a constante de secagem como uma função das variáveis do processo e verificaram que os parâmetros do modelo considerado foram grandemente afetados pelas dimensões das amostras e pela temperatura do ar de secagem. O conteúdo de umidade de equilíbrio do material foi ajustado pela equação de GAB.

## **2.5. Secador de leito fixo**

Vários tipos de secadores têm sido estudado com a finalidade de viabilizar a obtenção de um produto de alta qualidade segundo a diversidade de materiais a serem desidratados. Dentre esses, pode-se citar o secador de leito fixo.

Os secadores de leito fixo são caracterizados por apresentar baixo custo e possuir fácil operação. Nesses secadores, o produto permanece estático durante a secagem e o ar aquecido é forçado a passar pela massa do produto. Eles possuem diversas vantagens por serem de configuração bastante simples, resultando num baixo custo de implantação e serem muito versáteis podendo ser utilizados para a secagem de diferentes produtos alimentícios. Este tipo de secador é constituído de uma camada de secagem, a qual é insuflado por um ventilador. Nos secadores de leito fixo, o ar de secagem movimenta-se da camada inferior para a superfície da massa do produto. A troca de umidade que acontece entre o produto e o ar ocorre em uma região denominada zona de secagem, a qual se move da camada inferior para a superfície da massa, conforme a secagem, dando origem a um gradiente de umidade, o qual

não pode ser elevado por comprometer a qualidade do produto final (Nucci Murr, 1995; Gouveia et al., 1999a).

Brooker et al. (1992) relatam que as principais vantagens para este tipo de secador é que a colheita pode ser feita em qualquer período, possuindo manuseio simplificado e alta eficiência, além de que, a transferência de umidade do produto para o ar ocorre em faixa finita. No início da secagem esta faixa encontra-se no fundo do leito, movendo-se através da massa em sentido ascendente, de modo que no final o produto se encontre seco.

## 2.6. Isotermas de sorção

A atividade de água ( $a_w$ ) é um parâmetro que determina a quantidade de água disponível para o crescimento microbiano (deteriorantes e ou não deteriorantes) e para o aparecimento de reações deteriorantes e indesejáveis, entre tais pode-se citar: o escurecimento, a oxidação e a hidrólise (Vitali, 1987).

Spiess e Wolf (1983) definem a atividade de água ( $a_w$ ) como sendo o conteúdo de umidade que este alimento apresenta quando a pressão de vapor de água em sua superfície ( $P$ ) se iguala a pressão de vapor da água do ar que envolve o alimento ( $P_0$ ), de acordo com a Equação 1.

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{\%UR}{100} \quad (1)$$

em que:

$a_w$  = atividade de água;

$P$  = pressão de vapor de água no alimento, mm Hg;

$P_0$  = pressão de vapor de água pura, mm Hg;

$UR$  = umidade relativa.

A atividade de água de um produto não é somente em função do teor de água, mas também de substâncias que exercem o efeito de ligação na estrutura do alimento. Alimento com o mesmo conteúdo de umidade pode ter diferente atividade de água, dependendo do seu conteúdo de água ligando substâncias a sua estrutura (Gouveia et al., 1999).

A importância da obtenção de dados experimentais de atividade de água é bem conhecida, tendo-se em vista o valor da mesma nas inúmeras aplicações em secagem, e armazenagem de produtos agrícolas. Atualmente, têm-se empregado esforços para a obtenção de equações que expressam a atividade de água de cada produto em função da temperatura e da umidade relativa do ar (Farias et al., 2002; Leite et al., 2002; Silva et al., 2002).

Sendo o alimento formado de água e matéria seca, e contendo: proteínas, vitaminas, sais minerais, entre outras, a atividade de água não é somente função do conteúdo de água, mas também destas substâncias as quais exercem o efeito de ligação de água na estrutura do alimento. O conteúdo de água no alimento não fornece indicações da sua distribuição, se toda água está ligada do mesmo modo ao alimento como também não fornece indícios sobre as propriedades que esta água terá, tendo em vista a composição do alimento (Bobbio e Bobbio, 1992).

Todos alimentos contêm água, no entanto, a água não se encontra ligada do mesmo modo. Sanchez (1994) cita em que alguns casos, a água pode estar relativamente livre e em outros estar ligada a estrutura do alimento, não ficando disponíveis para o processo de deterioração. Assim sendo, o conceito de atividade de água em um alimento permite quantificar o grau de liberdade de água contida no mesmo. Portanto, o controle de atividade de água é muito importante na preservação e desenvolvimento de novos produtos alimentícios.

Uma isoterma de sorção pode apresentar três regiões, dependendo do estado de água presente no alimento: a primeira região representa a adsorção na monocamada molecular de um filme de água, e está entre 0 e 35 % de umidade relativa; a segunda região, que representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada, localiza-se entre 35 e 60 % de umidade relativa; a terceira região localizada acima de 60 % de umidade relativa, representa a água condensada nos poros do material, seguida pela dissolução de materiais solúveis presentes (Prado et al., 1999).

A obtenção dos dados experimentais com a finalidade de se determinar às curvas de umidade de equilíbrio são normalmente feitas por dois métodos, o estático e o dinâmico. No estático, a umidade de equilíbrio entre o produto e a atmosfera circundante é atingida sem movimentação do ar ou do produto; no método dinâmico, o ar ou produto é movimentado até que o equilíbrio seja atingido (Brooker et al., 1992).

Um outro método para o levantamento das curvas, também estático, foi utilizado por Capriste e Rotstein (1982) que consiste em um método indireto, ou seja, quantifica a atividade de água, através de um medidor eletrônico de amostras com diferentes teores de umidade, obtidas a partir de um processo de secagem sob condições suaves. As amostras são retiradas do secador em intervalos de tempo pré-definidos, colocando-as em recipientes herméticos termostatizados, a fim de homogeneizar a temperatura e a distribuição da umidade. A vantagem de utilizar esta metodologia é a aquisição de um maior número de dados experimentais, melhorando a precisão da curva de sorção. Como a aquisição de dados é feita através de um processo de secagem, possui a vantagem de diminuir o tempo de equilíbrio e atingir valores de atividade de água altos. Isto é vantajoso em relação ao método gravimétrico, onde muitas vezes perde-se a amostra por deterioração, quando estas se apresentam com altos valores de atividade de água (Yoshida et al., 2000).

## **2.7. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas**

Um determinado modelo de isoterma pode ser considerado mais adequado do que outro principalmente quando descreve com maior precisão o fenômeno de adsorção para uma ampla faixa de atividade de água (Iglesias e Chirife, 1983).

As teorias de adsorção física de BET foram estudadas por Guggenheim, Anderson e de Boer (Prado et al., 1999) os quais descrevem uma equação triparmétrica, conhecida como GAB, que permite ajustar dados de sorção de produtos agrícolas até a atividade de água de 0,9.

O modelo de GAB está sendo utilizado em vários laboratórios oficiais de alimentos nos EUA e na comunidade Européia como padrão de descrição e comparação de isotermas por apresentar maior quantidade de parâmetros, sendo recomendada pelo projeto europeu COST 90 (Jowitt et al., 1983).

Halsey (Prado et al., 1999) desenvolveu uma equação, considerando a condensação da multicamada a uma distância relativamente grande da superfície. Assumindo que a magnitude do parâmetro  $b$  caracteriza o tipo de interação entre o vapor e o sólido. Se  $b$  é grande, a atração entre o sólido e o vapor é muito específica e não se estende para muito longe da superfície. Se  $b$  é pequeno, as forças de atração predominantes são de Wan der Waals e são capazes de agir a grandes distâncias da superfície.

Chifre e Iglesias (Gouveia et al., 1999a) simplificaram a equação de Halsey e encontraram resultados satisfatórios para mais de 220 isotermas experimentais testadas. Os mesmos autores descreveram o modelo de Oswin como sendo uma expansão de uma série matemática para curvas sigmoidais.

## **2.8. Caracterização físico-química**

Os frutos têm importante papel na alimentação humana, principalmente por serem importantes fontes de vitaminas, minerais e fibras dietéticas. Os componentes mais abundantes em frutos e hortaliças são a água e os carboidratos. Do ponto de vista nutricional, são considerados as vitaminas e os minerais, como também os sólidos e polissacarídeos (amido em alguns frutos e hortaliças) como fonte energética (Chitarra e Chitarra, 1990). A importância nutricional da banana é mais destacada nos países tropicais, onde a fruta é uma fonte de energia relativamente barata.

O teor de água em qualquer alimento é de grande importância sob vários aspectos. Na realidade, é uma das determinações de difícil execução, visto que os métodos usuais para a quantificação envolvem a destilação da água presente no alimento e, com isto, outros compostos voláteis também são evaporados. Na determinação do teor de água de um produto alimentício, o termo umidade refere-se à somatória da água volatilizada nas condições do método analítico e dos demais componentes também volatilizados ou decompostos pelo calor. Assim, o teor de sólidos totais de um produto representa, teoricamente, valor igual ou inferior ao valor real (Angelucci et al., 1987).

Vários fatores tomam importante a determinação do pH de um alimento, tais como: influência na palatabilidade, desenvolvimento de microrganismos, definições da temperatura do tratamento térmico a ser utilizado, indicação da embalagem, seleção do tipo de material de limpeza e desinfecção, definição do equipamento com o qual a indústria vai trabalhar, seleção de aditivos e vários outros (Ciabotti et al., 2000).

As cinzas em alimentos correspondem ao resíduo inorgânico remanescente da queima da matéria orgânica, sem resíduo de carvão (Angelucci et al., 1987). Frutas, vegetais e seus derivados como qualquer outro alimento, contém material orgânico que deve ser destruído antes da estimativa dos minerais. Diversos minerais encontram-se presentes em frutos e hortaliças, notadamente: o cálcio, o ferro, o potássio e o magnésio, porém tem pequena contribuição nos requerimentos dietários do homem, mas em alguns casos, os níveis encontrados podem ser elevados (Chitarra e Chitarra, 1990).

Sólidos solúveis é a percentagem em peso de sólidos solúveis numa solução. O valor do °Brix é a correspondência entre o índice de refração e a percentagem de sacarose em soluções aquosa, na prática usa-se a leitura refratométrica direta ou o correspondente grau Brix para se expressar os sólidos solúveis (Carvalho et al., 1990).

Rodrigues et al. (1997) em pesquisa sobre o comportamento de algumas variedades de manga afirmaram que o teor de sólidos solúveis em frutos é importante, uma vez que quanto maior seu valor, menor será a quantidade de açúcar a ser adicionado na indústria quando os frutos são processados, diminuindo o custo de produção e melhorando a qualidade do produto.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

Este trabalho foi conduzido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola em conjunto com o Laboratório de Transferência em Meios Porosos e Sistemas Particulados do Departamento de Engenharia Química, ambos da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

#### **3.1. Matéria-prima**

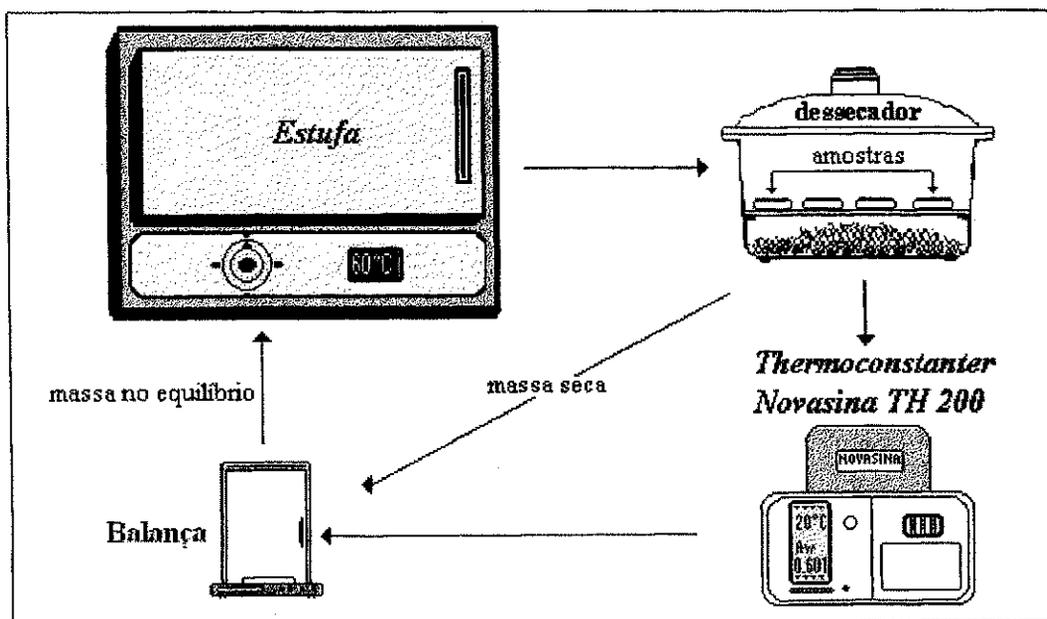
As bananas da variedade prata (*Musa acuminata* L.) nos estádios madura e semiverde, foram adquiridas no comércio local de Campina Grande, procedentes de pomares de produtores da região da Paraíba.

#### **3.2 Isotermas de dessorção**

Para determinação das isotermas de dessorção da banana maduro e semiverde, foi utilizado o equipamento *Termoconstanter Novasina TH 200*, projetado para a medida de atividade de água com temperatura controlada.

Nesse equipamento, a temperatura da câmara de medição, onde são colocadas as amostras, é regulada por meio de um controlador localizado na frente do mesmo, que serve para fixar o valor da temperatura desejada com uma variação menor que 0,2 °C, em toda sua escala que é de 0 a 50 °C. A referida câmara combinada com o regulador de temperatura, forma um mini gabinete climático, equipada com sensores de umidade e temperatura.

As isothermas de dessecção foram determinadas pelo método estático-indireto com base no estudo efetuado por Capriste e Rotstein (1982). Inicialmente 7,0 g das amostras em forma de cubos foram colocadas em células plásticas, que acompanham o equipamento e pesados em balança analítica, com precisão de 0,0001 g. Posteriormente passaram por um período de secagem de 3 horas, a uma temperatura de 60 °C, em estufa de circulação forçada de ar. Após este período, as amostras foram retiradas da estufa e colocadas no dessecador. As células plásticas, contendo as amostras foram levadas ao equipamento *Thermoconstanter Novasina TH-200*, para realizar a determinação da atividade de água ( $a_w$ ), às temperaturas de 20, 30 e 40 °C. As amostras ficavam no equipamento até que a leitura da atividade de água se estabilizasse, em seguida foram retiradas e pesadas em balança analítica, marca HR-200 e colocadas na estufa durante 15 minutos, para depois deste período se efetuar uma nova leitura. Este processo repetiu-se até que a última leitura da atividade de água fosse igual ou maior que a penúltima. Cada leitura obtida para cada temperatura, correspondia a um ponto da curva da isoterma de dessecção da banana. Em seguida as amostras foram levadas à estufa a temperatura de 60 °C durante 24 horas para determinação da massa seca (Figura 1).



**Figura 1.** Mecanismo de atividade de água

A umidade de equilíbrio foi calculada pela diferença entre a massa que a amostra apresentou no equilíbrio e a sua massa seca (Equação 2).

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (2)$$

em que:

$X_{eq}$  = umidade de equilíbrio, b.s;

$m_{eq}$  = massa da amostra no equilíbrio, g;

$m_s$  = massa da amostra seca, g.

### 3.3. Ajustes dos modelos

Para o ajuste das isotermas de desorção da banana, mediante análise de regressão não linear dos dados obtidos, foram testados os modelos de BET (Eq. 3), GAB (Eq. 4), Halsey (Eq. 5) e Oswin (Eq. 6), empregando-se o programa computacional Statistica 5.0, com critérios de convergência de 0,0001.

**BET:**

$$\frac{x}{x_m} = \frac{C a_w}{1 - a_w} \left[ \frac{1 - (n+1)(a_w)^n + n(a_w)^{n+1}}{1 - (1-C)a_w - C(a_w)^{n+1}} \right] \quad (3)$$

em que:

$a_w$  = atividade de água;

$n$  = número de camadas moleculares;

$x$  = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

$x_m$  = conteúdo de umidade na monocamada molecular;

$C$  = constante de BET que está relacionada ao calor de sorção da camada molecular.

**GAB:**

$$X_e = \frac{X_m CK a_w}{(1 - K_{sw})(1 - K_{sw} + CK_{sw})} \quad (4)$$

em que:

$a_w$  = atividade de água, adimensional;

$X_e$  = conteúdo de umidade de equilíbrio, Kg Kg<sup>-1</sup>;

$X_m$  = conteúdo de umidade na monocamada molecular, Kg Kg<sup>-1</sup>;

$C$  e  $K$  = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto.

**Halsey:**

$$a_w = \exp\left(\frac{-a}{X_e^b}\right) \quad (5)$$

em que:

$a_w$  = atividade de água, adimensional;

$X_e$  = umidade de equilíbrio expressa em base seca, Kg Kg<sup>-1</sup>;

$a$  e  $b$  = constantes que dependem da temperatura e natureza do produto.

**Oswin:**

$$X_e = a \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b \quad (6)$$

em que:

$a_w$  = atividade de água, adimensional;

$a$  e  $b$  = constantes de ajuste do modelo;

$X_e$  = umidade de equilíbrio, Kg Kg<sup>-1</sup>.

Com base na Equação 7 Lomauro et al. (1985) consideram que valores com erro relativo médio abaixo de 10 % indicam um razoável ajuste para as práticas propostas.

$$E = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|(M_i - Mp_i)|}{M_i} \quad (7)$$

em que:

$E$  = erro médio relativo;

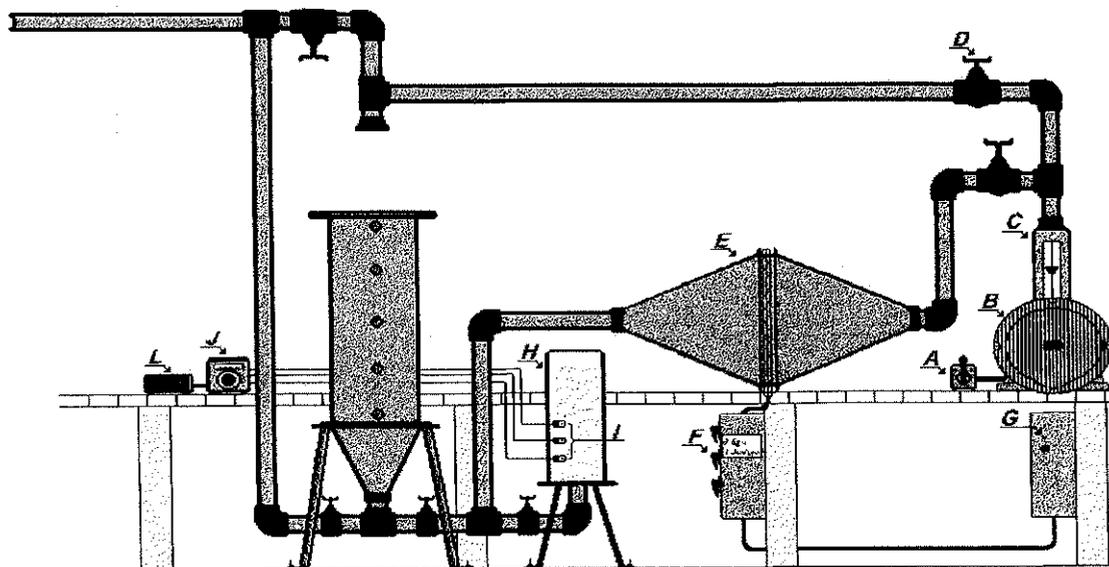
$M_i$  = valores obtidos experimentalmente;

$Mp_i$  = valores preditos pelo modelo;

$n$  = número de dados experimentais.

### 3.4. Cinética de secagem

As temperaturas de secagem foram realizadas em quatro níveis térmicos (60, 80, 100 e 120 °C) e duas velocidades do ar de secagem (1,0 e 2,0 m.s<sup>-1</sup>) em um secador de leito fixo, contendo uma câmara de secagem formada por uma coluna cilíndrica 17,8 cm de diâmetro e 60,0 cm de altura. Possui uma seção inferior troncônica, que funciona como distribuidor de ar, onde são colocadas esferas de vidro para permitir que o escoamento do ar seja uniforme em todo o leito. A coluna é isolada termicamente com uma camada de amianto de 1,5 cm de espessura. Nas suas laterais, existem furos, onde são colocados os termopares para medição da temperatura do ar de secagem. Também, existe um outro termopar colocado no fundo da seção cônica, que serve para enviar sinal para o controlador de temperatura (Figura 2).



**Figura 2.** Secador de leito fixo: A- chave do compressor; B- compressor radial; C- medidor de vazão; D- válvula reguladora; E- aquecedor elétrico; F- chave das resistências; G- chave do sistema de controle; H- câmara de secagem; I- termopares; J- controlador de temperatura; L- milivoltímetro digital.

Antes do início de cada ensaio, o equipamento foi colocado em funcionamento, nas condições experimentais de secagem definidas. Com o compressor radial ligado, a vazão do ar foi regulada através da válvula reguladora, e, com um anemômetro de hélices, colocado na boca da saída do secador, mediu-se a velocidade do ar de secagem. O sistema de aquecimento foi ligado a partir da chave do sistema de controle, ajustando-se as temperaturas de secagem através do controlador de temperatura, que emitia para o milivoltímetro a leitura referente a cada temperatura desejada.

As amostras formadas por rodela de espessura de 0,5 cm eram colocadas em uma cesta de material metálico, com o fundo de tela de arame em malha fina. O conjunto (cesta + amostra) foi pesado e colocado na câmara de secagem, procedendo-se ao início da operação. O conteúdo de umidade perdido durante a secagem foi obtido por pesagens descontínuas das amostras. O esquema de pesagem seguiu intervalos de 5, 10, 30 e 60 minutos até o final do processo. As pesagens foram realizadas até que as variações de peso fossem insignificantes. Posteriormente, as amostras foram colocadas em estufas à temperatura de  $100 \pm 2$  °C por 3 horas, para determinação da massa seca AOAC (1998).

### **3.5. Modelo difusional**

Os dados experimentais foram ajustados pelo método Quasi-Newton (Statistica, 1995) baseada na teoria de difusão líquida e determinação dos coeficientes da equação 8 por regressão não-linear, utilizando-se os primeiros termos desta equação.

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

em que:

$X$  = conteúdo de umidade, g;

$X_e$  = conteúdo de umidade de equilíbrio, g;

$X_o$  = conteúdo de umidade inicial, g;

$\frac{X - X_e}{X_o - X_e}$  = razão de umidade, b.s.;

$D_{ef}$  = difusividade efetiva,  $m^2 \cdot h^{-1}$ ;

$t$  = tempo, h;

$L$  = espessura média, m.

### **3.6. Caracterização físico-química da banana**

#### **3.6.1. pH**

Para as determinações físico-químicas da banana prata nos estágios de maturação (maduro e semiverde) foram realizadas com três repetições.

A determinação do pH foi realizada pelo método potenciométrico, utilizando pHmetro da Marca Analyser. A calibração foi feita com soluções (4,0 e 7,0) que consiste em calibrar o aparelho a uma temperatura de 20 °C.

#### **3.6.2. Cinzas**

Utilizou-se o método descrito pelo INSTITUTO ADOLFO LUTZ (Lara et al., 1976) com os resultados expressos em percentagem (%).

Para determinação das cinzas pesou-se aproximadamente 10 g da polpa de banana. As amostras colocadas em cápsula de porcelana, previamente aquecida em placa aquecedora, foram levadas a uma mufla a  $550 \pm 3$  °C para incineração total. Depois foram resfriadas em dessecador até a temperatura ambiente e em seguida pesadas.

### **3.6.3. Sólidos solúveis (°Brix)**

O °Brix foi determinado em refratômetro digital automático, marca Acatec modelo RDA 8600. Inicialmente, homogeneizou-se as amostras, que em seguida foram transferidas para o prisma do refratômetro, desprezando-se as partículas grandes da polpa. Esperou-se até que a temperatura da amostra e do aparelho se igualasse antes da leitura. Os resultados em °Brix eram corrigidos automaticamente pelo equipamento.

### **3.6.4. Umidade**

Para a determinação do conteúdo de umidade da banana foi utilizado o método descrito pela AOAC (1998) que recomenda o uso de cadinhos de papel de alumínio secos a  $100 \pm 2$  °C em estufa com circulação de ar (MA-035). As amostras de 10 g foram levadas a estufa a uma temperatura de  $105 \pm 2$  °C por 24 horas. Todas as pesagens foram feitas em balança de precisão de 0,0001 g. Os resultados foram expressos em percentagem (%).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Isotermas de dessorção

Os resultados experimentais da atividade de água ( $a_w$ ) com suas respectivas umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ) a diferentes temperaturas (Tabela 2), refere-se a dessorção da polpa de banana prata, nos estádios maduros e semiverde.

**Tabela 2.** Valores experimentais de atividade de água e umidade de equilíbrio de banana prata nos estádios maduro e semiverde para as temperaturas 20, 30 e 40 °C

Temperatura (°C)	Atividade de água ( $a_w$ )		Umidade de equilíbrio $X_{eq}$ (Kg Kg <sup>-1</sup> )	
	Banana Maduro	Banana Semiverde	Banana Maduro	Banana Semiverde
20	0,479	0,511	0,046	0,069
	0,520	0,535	0,073	0,085
	0,580	0,567	0,123	0,102
	0,644	0,593	0,184	0,117
	0,689	0,663	0,254	0,143
	0,715	0,660	0,363	0,165
30	0,499	0,596	0,139	0,205
	0,532	0,632	0,184	0,246
	0,548	0,658	0,240	0,300
	0,664	0,697	0,330	0,360
	0,669	0,726	0,407	0,422
	0,728	0,740	0,490	0,505
40	0,550	0,592	0,057	0,122
	0,635	0,660	0,109	0,170
	0,692	0,713	0,183	0,261
	0,736	0,735	0,274	0,330
	0,779	0,798	0,380	0,453
	0,809	0,801	0,540	0,531

Verifica-se que o conteúdo de umidade de equilíbrio varia com as mudanças de temperatura, sendo maior na temperatura de 30 °C frente à temperatura de 20 e 40 °C. Estes resultados encontraram apoio nos trabalhos de Silva et al. (2002) ao afirmarem que a polpa de manga entra em equilíbrio higroscópico com valores distintos, dependendo da temperatura a que são submetidas. Observa-se, de forma geral, que a umidade de equilíbrio para a banana prata no estágio maduro é sempre menor que para a banana prata semiverde.

Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros estimados obtidos por regressão não linear para os modelos BET, GAB, Halsey e Oswin e os parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção de banana prata em cada temperatura estudada, assim como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os erros médios relativos ( $E$ ).

De acordo com os resultados da Tabela 3, observa-se que o conteúdo de umidade da camada monomolecular ( $X_m$ ) do modelo de GAB apresentou flutuações aleatórias dentro da faixa de temperatura estudada, para a banana madura. Resultado semelhante ocorreu na determinação de umidade em monocamada do referido modelo, para as isotermas de dessorção da goiaba (Araújo et al., 2001). Para a banana semiverde, o conteúdo de umidade da camada monomolecular ( $X_m$ ) no modelo de GAB aumentou com o aumento da temperatura, já o parâmetro C do referido modelo, decresceu com o aumento da temperatura, o mesmo ocorrendo para a banana no estágio maduro. Afirmativa concordante com Moura et al., (2001) em secagem de caju, onde concluíram que o valor do parâmetro C do modelo de GAB diminuiu com o aumento da temperatura.

**Tabela 3.** Parâmetros de ajuste das isotermas de dessecção de banana nos estádios maduro e semiverde para os diferentes modelos matemáticos estudados

Modelos	Maturação		Parâmetros			R <sup>2</sup> (%)	E (%)
			Xm	C	n		
BET	20 °C	Maduro	0,280	0,378	18	98,20	8,10
		Semiverde	0,353	0,204	18	98,44	2,79
	30 °C	Maduro	19,397	0,002	18	99,94	7,41
		Semiverde	0,324	0,125	18	97,66	4,98
	40 °C	Maduro	4,105	0,006	18	99,29	7,74
		Semiverde	0,169	0,262	18	99,31	2,36
GAB	20 °C	Maduro	0,142	1,251	1,052	98,79	7,72
		Semiverde	0,076	2,843	1,154	98,83	2,64
	30 °C	Maduro	2,869	0,012	1,004	99,40	7,71
		Semiverde	1,362	0,034	0,934	97,56	5,52
	40 °C	Maduro	1,673	0,014	1,005	99,68	5,52
		Semiverde	1,477	0,032	0,901	99,32	2,33
HALSEY	20 °C	Maduro	a	b		98,71	7,83
		Semiverde	0,185	0,756		98,65	2,41
	30 °C	Maduro	0,193	0,623		99,36	7,94
		Semiverde	0,189	0,489		97,33	6,49
	40 °C	Maduro	0,144	0,632		99,67	5,63
		Semiverde	0,156	0,498		99,08	2,71
OSWIN	20 °C	Maduro	a	b		98,69	7,54
		Semiverde	0,164	1,122		98,56	2,64
	30 °C	Maduro	0,121	1,333		99,63	6,21
		Semiverde	0,067	1,660		97,49	5,67
	40 °C	Maduro	0,076	1,362		99,75	4,15
		Semiverde	0,044	1,732		99,32	2,35

Com base nos resultados, verifica-se que as constantes dos modelos variaram com a temperatura e os estádios de maturação dentro e entre as temperaturas e que os modelos de Oswin e GAB descreveram com precisão as isotermas de dessecção para a atividade de água de 0,479 a 0,809, com valores de coeficiente de determinação variando de 97,33 a 99,94 % e erro médio relativo de 2,33 a 8,10 %. É notório observar que o maior erro

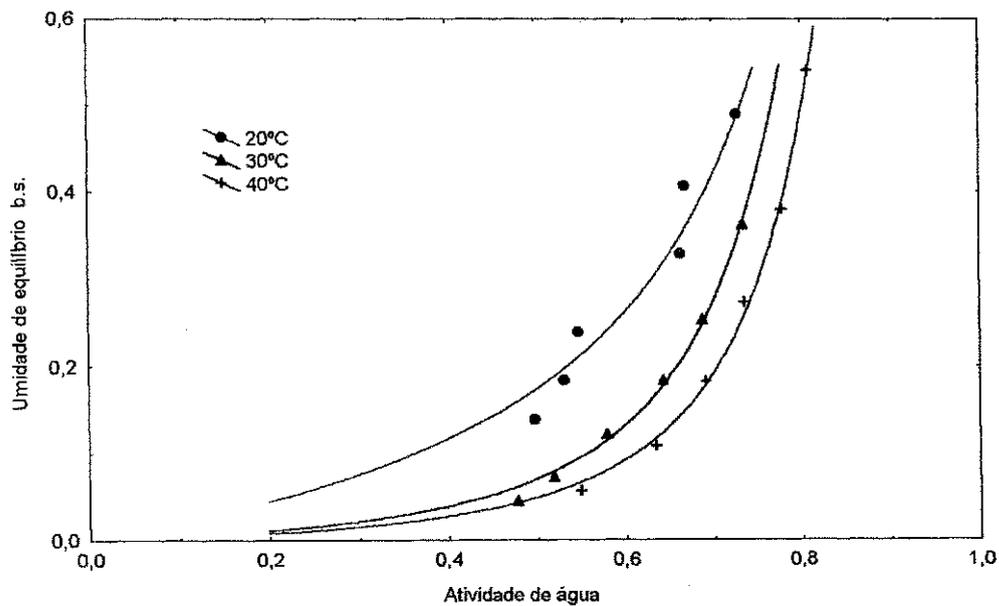
médio relativo se deu para a banana no estágio maduro no modelo de BET à temperatura de 20 °C e para a banana semiverde no modelo de Halsey a temperatura de 30 °C, tendo este sido de 8,10 e 6,49 %, respectivamente para este modelo nas ordens apresentadas.

Para a banana no estágio maduro nas temperaturas estudadas (20, 30 e 40 °C) tem-se que os modelos de Oswin e GAB foram os que melhor representaram as isotermas de dessorção desse produto. Resultado similar foi encontrado por Araújo (2001) estudando isotermas de dessorção de goiaba. Enquanto para a banana semiverde, os modelos de melhor representatividade foram os de Halsey e GAB para a temperatura de 20 °C, BET e GAB para a temperatura de 30 °C e GAB que representou com maior precisão o ajuste das isotermas de dessorção para a temperatura de 40 °C.

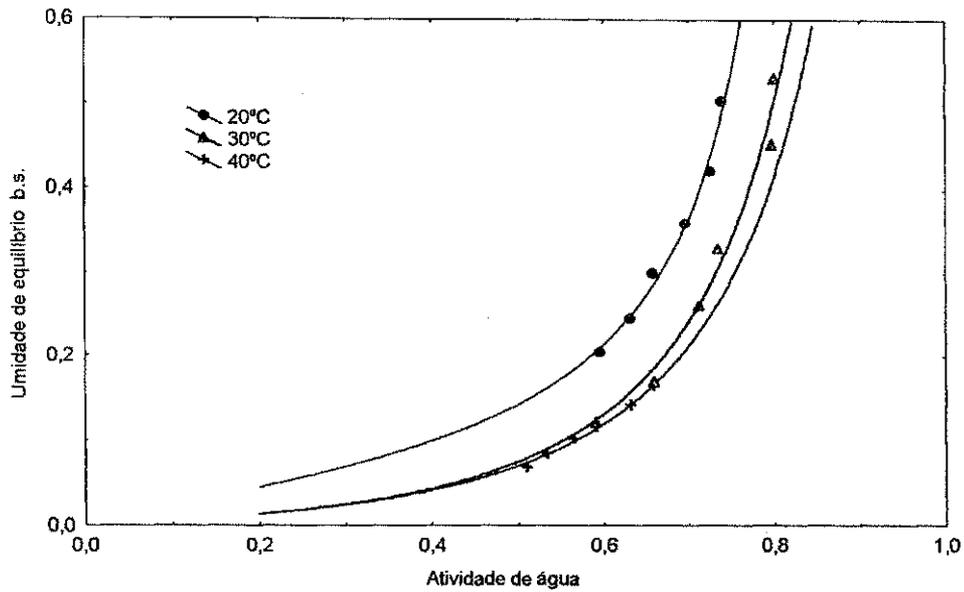
De acordo com os resultados dos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do erro médio relativo ( $E$ ) todos os modelos testados descreveram satisfatoriamente as isotermas de dessorção da polpa da banana frente aos dois estádios de maturação estudados (maduro e semiverde) uma vez que seus coeficientes ficaram acima de 97,33 % e o erro médio relativo inferior ou igual a 8,1 %.

Em resumo, os modelos analisados descrevem satisfatoriamente as isotermas de dessorção da banana prata no estágio maduro e semiverde para as temperaturas estudadas. O emprego das equações para descrever as isotermas de produtos agrícolas, onde a equação de GAB, na literatura, é a mais indicada, por ser triparamétrica, foi escolhida para representar as isotermas de dessorção da polpa da banana prata madura e semiverde. Kiranoudis et al. (1993) utilizaram este modelo para descrever as isotermas de alguns vegetais, nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C e atividade de água entre 0,10 a 0,90; Kiranoudis et al. (1997) sugeriram este modelo (GAB) para representar as isotermas de maçã, pêra, kiwi e banana; Kechaou e Maalej (1999) verificaram que o modelo de GAB apresentou satisfatoriamente as isotermas de dessorção de banana nas temperaturas de 35, 50 e 70 °C e atividade de água de 0 a 0,90.

As isotermas de dessecção da banana no estágio maduro e semiverde, para as temperaturas de 20, 30 e 40 °C (Figuras 3 e 4), evidenciam que o aumento da atividade de água ( $a_w$ ) para cada temperatura resulta em aumento da umidade de equilíbrio. A taxa de dessecção é mais alta no início do processo, devido, principalmente, a facilidade de redução da umidade. Esses resultados também foram observados por Adam et al. (2000) estudando isotermas de sorção de cebola. As curvas apresentaram forma característica de equilíbrio de material higroscópico, onde os pontos correspondem às mesmas e alinham-se ao longo delas.



**Figura 3.** Isotermas de dessecção da polpa de banana prata no estágio maduro para três temperaturas ajustadas pelo modelo de GAB.



**Figura 4.** Isotermas de desorção da polpa de banana prata semiverde para três temperaturas ajustadas pelo modelo de GAB.

#### 4.2. Cinética de secagem

Para a cinética de secagem de banana prata nos estádios maduro e semiverde em camada fina analisaram-se as influências das principais variáveis do processo: temperatura e velocidade do ar de secagem, apresentada na forma adimensional do conteúdo de umidade  $(X-X_e)/(X_o-X_e)$  em função do tempo (Figuras 5 e 6) e Tabelas A1, A2, A3 e A4 do Apêndice A.

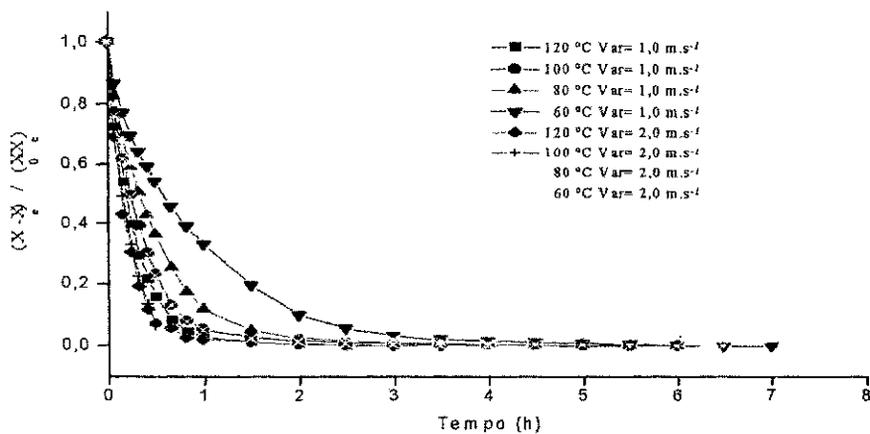


Figura 5. Cinética de secagem de banana prata no estágio maduro para quatro temperaturas e duas velocidades do ar de secagem.

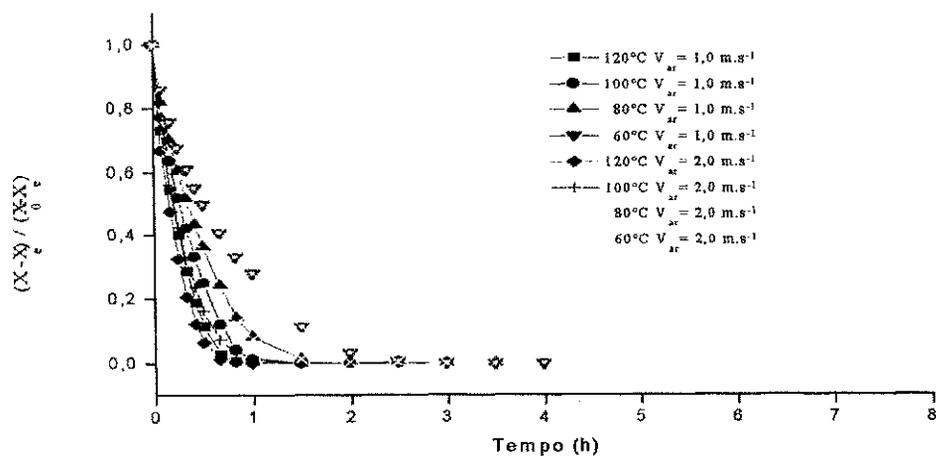


Figura 6. Cinética de secagem de banana prata semiverde para quatro temperaturas e duas velocidades do ar de secagem.

Observa-se que as curvas de secagem de banana madura e semiverde ocorrem de forma decrescente para as condições estudadas, não apresentando período de taxa constante, o que pode ter ocorrido pela natureza da umidade, uma vez que mesmo havendo umidade superficial livre, a água pode estar na forma de suspensão de células e de solução (açúcares e outras moléculas) apresentando uma pressão de vapor inferior a da água pura. A ausência de período a taxa constante também foi observado por Gabas et al. (1995); Vergara et al. (1997) e Almeida et al. (2002) estudando secagem de maçã, uva e algaroba respectivamente. Igualmente Islam e Flink (1982) e El-Anoar (2001) em secagem de batata e mamão pré-tratados por osmose, respectivamente, explicaram ganho de sólidos aliado a perda de água no processo osmótico, dificultando desta maneira a saída de água durante a secagem, uma vez que a água mais livre é retirada durante o pré-tratamento. Observa-se ainda, que maiores valores de temperatura e velocidade do ar de secagem, com exceção da temperatura de 120 e de 100 °C para a banana prata semiverde, diminuiu o tempo de secagem das amostras, encontrando-se no presente trabalho que a cinética de secagem foi grandemente influenciada por esses fatores, onde se observa uma redução do tempo gasto para a secagem em função da elevação da temperatura, exceto para a temperatura de 120 °C e velocidade 2,0 m.s<sup>-1</sup>, onde o processo ocorreu mais lento que para a velocidade de 1,0 m.s<sup>-1</sup> na mesma temperatura. Já para a banana semiverde houve uma pequena influência na temperatura de 100 °C, onde a velocidade de 2,0 m.s<sup>-1</sup> resultou num tempo maior de secagem, ocorrendo de forma mais lenta, do que para a velocidade de 1,0 m.s<sup>-1</sup>, desta forma, pode-se considerar a velocidade como uma variável de menor importância no processo de secagem para a banana semiverde. Fotos encontradas no Apêndice B.

As curvas de secagem (Figuras 5 e 6) apresentaram-se de forma bem definida, ou seja, sem flutuações nos pontos, indicando uma condição de homogeneidade no secador. Verificou-se que a perda do conteúdo de umidade é mais rápida no início do processo de secagem. Com relação à temperatura tem-se que quanto mais elevada maior é a taxa de secagem. Considerando-se as temperaturas de 60 e 120 °C e velocidade de 1,0 m.s<sup>-1</sup>, o tempo gasto para a secagem de polpa banana, no estágio maduro foi de 6,5 e 2,5 horas, respectivamente. Já no estágio semiverde, para as mesmas condições de secagem, o tempo foi de 4,0 e 2,0 horas respectivamente. Observa-se, mediante os resultados, uma importante diminuição no tempo

gasto para secar a banana nos estádios de maturação em função da elevação da temperatura; indicando ser a temperatura o principal fator que influencia no processo de secagem. Comportamento similar foi observado por Silva et al. (2002) ao concluírem que a polpa de manga entra em equilíbrio higroscópico com valores distintos, dependendo da temperatura a que foram submetidas. Farias et al. (2002) também encontraram resultados semelhantes para cajá, ao observarem que a cinética de secagem deste fruto é fortemente influenciada pela temperatura e Moura et al. (2001) ao afirmarem que o tempo gasto para secar o caju em temperaturas mais baixas (35 e 40 °C) foi o dobro do tempo utilizado na temperatura mais elevada (65 °C) que foi de 6 horas.

#### **4.3 Modelo difusional**

As Tabelas 4 e 5 contêm os valores obtidos para a difusividade de polpa de banana nos estádios maduro e semiverde, respectivamente, obtidos por ajustes não linear das curvas de secagem.

Analisando-se o coeficiente de determinação e o erro médio relativo da banana no estádio maduro para todas as temperaturas estudadas (Tabela 4), observou-se que estes coeficientes estão de acordo com a literatura (Lomauro et. al.,1985 e Barros Neto et. al., 1995). Para a polpa no estádio maduro submetido à velocidade de 1,0 m.s<sup>-1</sup>, o erro médio relativo foi maior em todas as temperaturas estudadas, já para a polpa semiverde, a superioridade ocorreu à temperatura de 120 °C a essa velocidade de secagem.

**Tabela 4.** Valores de difusividade efetiva de polpa de banana prata no estágio maduro estimada pelo modelo difusional, nas temperaturas 60, 80, 100 e 120 °C

Temperatura (°C)	Velocidade (m.s <sup>-1</sup> )	Difusividade (10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup> (%)	E (%)
60	1,0	8,84	99,72	10,51
	2,0	1,30	99,72	9,54
80	1,0	1,61	98,86	10,80
	2,0	2,36	98,68	9,69
100	1,0	2,30	98,71	11,90
	2,0	4,00	92,96	10,68
120	1,0	4,02	98,64	10,90
	2,0	6,44	98,90	7,90

**Tabela 5.** Valores de difusividade efetiva de polpa de banana prata semiverde estimada pelo modelo difusional, nas temperaturas 60, 80, 100 e 120 °C

Temperatura (°C)	Velocidade (m.s <sup>-1</sup> )	Difusividade (10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup> (%)	E (%)
60	1,0	1,06	98,34	7,25
	2,0	1,34	98,54	7,31
80	1,0	1,66	97,53	8,53
	2,0	1,88	98,45	9,46
100	1,0	2,27	96,73	8,63
	2,0	2,87	98,37	8,48
120	1,0	3,23	97,59	12,79
	2,0	3,96	98,17	11,01

O período de secagem a taxa constante não foi observado em nenhuma das condições estudadas. Desta forma, o modelo difusional de Fick considerando geometria com placa infinita foi utilizado para o cálculo da secagem e da difusividade. Os resultados levam a afirmar que no período de taxa decrescente a migração de água por difusão se comportou conforme a Segunda lei de Fick, considerando a hipótese do não encolhimento.

Verifica-se ainda na Tabela 4 que a velocidade do ar para cada temperatura teve grande influência e quando ocorre um aumento da velocidade de 1,0 para 2,0 m.s<sup>-1</sup> há um aumento na difusividade efetiva para a banana no estágio maduro. Para a banana semiverde (Tabela 5), os resultados de velocidade do ar de secagem a cada temperatura, apresentam valores de difusividade efetiva muito próximos, indicando que a velocidade do ar nesse processo não exerce grande influência sobre os resultados.

Para a banana no estágio maduro verifica-se que com o aumento da velocidade do ar de 1,0 para 2,0 m.s<sup>-1</sup> com relação à temperatura de 60 °C, houve um decréscimo na difusividade efetiva. Resultado similar foi estudado por Gouveia et al. (1999b) analisando a difusividade do gengibre. Na temperatura de 120 °C e velocidade do ar de 2,0 m.s<sup>-1</sup> obteve-se o maior valor de difusividade efetiva, mostrando que com o aumento da temperatura ocorre maior difusão de água entre as moléculas.

Os valores de difusividade encontrados nesse estudo são de magnitude de 1,30-8,84 x 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> para a banana no estágio maduro e de 1,06-3,96 x 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> para a banana semiverde. Resultados que encontram apoio na literatura para frutas nos trabalhos de Silva et al. (2002); Azoubel e Murr (2000). Cardoso (1998) encontrou um único valor de difusividade, para a banana de 3,00 x 10<sup>-10</sup> m.s<sup>-1</sup>, sendo este obtido com desidratação osmótica e secagem a altas temperaturas por curto tempo (HTST).

Mediante os resultados contidos nas Tabelas 4 e 5 para banana no estágio maduro e semiverde, respectivamente, observa-se que o valor da difusividade aumenta com o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem. Este mesmo resultado foi verificado por Murr (1992) secando fatias de batata e Prado (1998) ao secar tâmaras para obtenção de tâmara-passa.

#### **4.5. Caracterização físico-química**

Na Tabela 6 estão contidos os valores médios das análises físico-químicas para a polpa da banana prata nos estádios maduro e semiverde utilizada neste trabalho.

**Tabela 6.** Determinações físico-químicas da polpa de banana prata nos estádios maduro e semiverde

<b>Composição</b>	<b>Valores obtidos</b>	
	<b>Maduro</b>	<b>Semiverde</b>
pH	4,23	4,41
Cinzas (%)	0,71	0,79
Sólidos solúveis (°Brix) (%)	24,2	13,1
Umidade (%)	68,81	67,24

De acordo com os resultados da (Tabela 6) não houve grandes variações nos valores absolutos dos componentes físico-químicos da polpa de banana no estágio maduro e semiverde. Verifica-se que a exceção das cinzas e do pH as demais composições apresentaram valores maiores para a banana no estágio maduro, destacando-se o °Brix com 24,2 % frente aos 13,1 % de banana semiverde. Estes resultados quando comparados aos da literatura por Carvalho (1981) e Chitarra e Chitarra (1990) indicam valores abaixo da média; comportamento que se deve, provavelmente a fatores tais como cultivar, origem, solo, práticas culturais, entre outros.

## **5. Conclusões**

Diante dos resultados obtidos para as condições em que foi realizado o trabalho, pode-se concluir que:

1. A dependência das isotermas com a temperatura pode ser expressa pelos modelos estudados, recomendando-se a equação de GAB para representar as isotermas de dessecagem da polpa de banana prata nos estádios maduro e semiverde estudados.
2. A cinética de secagem da banana prata no estádio maduro e semiverde ocorre no período de taxa decrescente.
3. O tempo de secagem da banana prata nos estádios maduros e semiverde foi fortemente influenciado pelas temperaturas estudadas (60, 80, 100 e 120 °C).
4. A velocidade do ar de secagem (1,0 e 2,0 m.s<sup>-1</sup>) teve influência no processo de secagem para as temperaturas estudadas de 60, 80, 100 e 120 °C, para a banana no estádio maduro. Banana semiverde a velocidade do ar de secagem foi considerada variável de menor importância, não exercendo grande influência sobre os resultados.
5. Os valores de difusividade efetiva obtidos para a banana prata no estádio maduro, situa-se entre  $1,30 \times 10^{-5}$  a  $8,44 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> e para banana semiverde entre  $1,06 \times 10^{-5}$  a  $3,96 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>.
6. A polpa no estádio maduro e semiverde da banana prata apresentou pH de 4,23 e 4,41; cinzas 0,71 e 0,79 %; °Brix 24,2 e 13,1 % e umidade 68,81 e 67,24 %, respectivamente.

## **6. Sugestões**

- 1 Estudar e analisar a qualidade do produto final de secagem em termos de propriedades físico-químicas e sensoriais.
- 2 Aumentar o número de bandejas durante a secagem.
- 3 Estudo da cinética de secagem considerando o encolhimento

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, E.; MUHLBAUER, W.; ESPER, A.; WOLF, W.F.; SPIESS, W. Effect of temperature on water sorption equilibrium of onion (*Allium cepa* L.). **Drying Technology**, v.18, n.9, p.2117-2129, 2000.

ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G.; VILLAMIL, J.M.P.; SILVA, M.M. Secagem natural e artificial de vagens de algaroba. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v.27, n.1, p.48-57, 2002.

ANGELUCCI, E. Análise Química de Alimentos. **Coordenadoria da Pesquisa Agropecuária – Instituto de Tecnologia de Alimentos**, Campinas, 1997.

AOAC - ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official Methods of Analysis, 1998. 16 ed., Gaithersburg, 1141p.

ARAÚJO, M.E.R. **Predição da cinética de secagem do fruto da goiabeira (*Psidium guajava* L.)**. Campina Grande: UFPB, 2001, 79P. (Dissertação de Mestrado).

ARAÚJO, M.E.R.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G.; SILVA, M.M. Atividade de água em goiaba (*Psidium guajava* L). In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, **Anais...**, Foz do Iguaçu, PR, 2001.

AZOUBEL, P.M.; MURR, F.E.X. Mathematical modelling of the osmotic dehydration of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum* var. Cerasiforme). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas, v.20, n.2, p.228-232, 2000.

BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, L.S.; BRUNS, R.S.E. **Planejamento de otimização de experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995. 299 p.

BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. Água. In: **Química do processamento de alimentos**, São Paulo, Ed. Varela, p.11-24, 1992.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Theory and simulation of grain drying. In: **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport the AVI Publishing Company, 1992. p.205-240.

BUBLITZ, E.O.; CARDOSO, V.T.M.; SILVEIRA, M.M.; KOLLER, O.L. **Diagnóstico da cultura da banana em Santa Catarina**. Florianópolis: EMPASC, 1980. 84P. (EMPASC. Boletim Técnico, 5)

CAPRISTE, G.H.; ROTSTEIN, E. Prediction of sorption equilibrium data for starch-containing foodstuffs. **Journal of Foods Science**. v.47, p.1501-107, 1982.

CARDOSO, C.S.B. **Secagem de fatias de banana em leite vibro-fluidizado a altas temperaturas por curto tempo**. Campinas: UNICAMP, 1998. (Dissertação de Mestrado).

CARVALHO, F.A.L. **Estudo da obtenção, condicionamento e armazenamento de banana passa e banana chips, utilizando-se os cultivares prata e nanicão (*Musa sapientum* L. e *Musa Cavendish* Lamb.)**. Fortaleza: UFC, 1981. (Dissertação de Mestrado).

CARVALHO, R.L.; MANTOVANI, D.M.B.; CARVALHO, P.R.N.; MORAES, R.M. **Análises químicas de Alimentos**. Campinas; ITAL, 1990, 121p.

CHIRIFE, J. **Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods**. In: MUJUNDAR, A.S. (ed). *Advances in drying*. Washington: Hemisphere Publishing Cooperation p.73-102. 1982.

CHITARRA, M.L.F.; CHITARRA, A.B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras, ESAL/FAEPE, 1990, 293p.

CIABOTTI, E.D.; BRAGA, M.E.D.; CAVALCANTI-MATA, M.E.R.M. Alterações das características físico-químicas da polpa de maracujá amarelo submetido a diferentes técnicas de congelamento inicial. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v.2, n.1, p.51-60, 2000.

CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. 2ed., Clarendon Press Oxford, 1975, 414 p.

DANTAS, J.L.L.; SOARES FILHO, W.S. **Banana para exportação - aspectos técnicos da produção**, Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria de Desenvolvimento Rural. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1999. p.11-13. (Série Publicações Técnicas FRUPEX; 18).

EL-AOUAR, A.A. **Avaliação do processo combinado de desidratação osmótica e secagem na qualidade de cubos de mamão formosa (*Carica papaya* L.)**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2001. (Dissertação de Mestrado).

FARIAS, E.S.; NASCIMENTO, J.; ALMEIDA, R.C.; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C.; PEREIRA, E.A. Obtenção das isotermas de dessorção do cajá. In: **XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 2002, Salvador, BA., 2002.

FIBGE – Fundação Instituto de Geografia e Estatística, **Anuário Estatístico do Brasil**, 1992.

GABAS, A. L.; RISSATO, M.; TELIS-ROMERO, J. Cinética de Secagem de Uva Itália e Rubi em Leito Fixo. In: I CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 1995, Campinas. **Resumos...** Campinas, SP, Brasil. , 1995.

GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C.; SILVA, F.H.; MURR, F.E.X. Estudo da cinética de secagem de gengibre em um secador de leito fixo. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, MG, v.24, n.2, p.20-27, 1999a.

GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C.; MURR, F.E.X. Estudo da difusividade e do encolhimento do gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, PB, v.1, n.1, p.51-58, 1999b.

IGLESIAS, H.A.A.; CHIRIFE, J. **Handbook of food isotherms: Water sorption parameters for food and food components**. Orlando: Academic Press, 1983.

ISLAM, M.N.; FLINK, L.N. Dehydration of potato II – osmotic concentration and its effect on air drying behavior. **Journal of Food Technology**, v.17, n.3, p.387-403, 1982.

JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTOM, B.; MEFFERT, H.F.T.; SPIESS, W.E.L. e VOS, G. Physical properties of foods. **Applied Science Publishers**, London and New York, 1983.

KIRANOUDIS, C.T.; TSAMI, E.T.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Equilibrium moisture-content and heat of desorption of some vegetables. **Journal of Food Engineering**, v.2, n.1, p.55-74, 1993.

KIRANOUDIS, C.T.; TSAMI, E.T.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some fruits, **Drying Technology**, New York, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.

KECHAOU, N.; MAALEJ, M. Desorption isotherms of imported banan. **Drying Technology**, New York, v.17, n.6; p.1201-1213, 1999.

KROKIDA, M.K.; TSAMI, E.; MAROULIS, Z.B. Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables, **Drying Technology**, New York, v.16, n.3, p.667-685, 1998.

KROKIDA, M.K.; KIRANOUDIS, C.T.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying related properties of apple. **Drying Technology**, New York, n.18, n.6, p.1251-1267, 2000.

LARA, A.B.W.H; NAZÁRIO, G.; ALMEIDA, M.E.W; PREGNOLATO, W. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 2 ed. São Paulo: Melhoramentos, 1976. v.1, 371p.

LEITE, J.C.A.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G.; SILVA, M.M.; CAVALCANTI-MATA, M.E.R.M. Determinação das isotermas de desorção de umidade da polpa de banana nanica utilizando modelos matemáticos. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO

DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS - CBCTA, *Anais...*, Porto Alegre, RS, 2002.

LIMA, A.G.B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana.** Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 265p. (Tese de Doutorado).

LIMA, A.G.B.; NEBRA, S.A. Theoretical analysis of the diffusion process inside prolate spheroidal solids. *Drying Technology*. Canadá, v.18, n.1-2, p.21-48, 2000.

LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Par I: Fruit, vegetable and meat products. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technologies*, v.18, p.112-122, 1985.

MOURA, R.S.F.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G.; SILVA, M.M.; FIGUEIRÊDO NETO, A. Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de caju. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, *Anais...* 2001, Foz do Iguaçu, PR, 2001.

MURR, F.E.X. **Estudo comparativo dos fenômenos de secagem de batata (*Solanum tuberosum*, L. Cultivar Bintje).** Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1992. 188 p. (Tese de Doutorado)

NUCCI, M.A.S.; MURR, F.E.X. Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem na qualidade do gengibre seco In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 3, 1995, Campinas. **Livro de Resumos**. 1995. v.1 p.158.

PARK, K.J. **Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem.** Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos, 54p. 1987. (Tese, Livre docência em Fenômenos de Transporte).

PRADO, M.E.T. **Secagem de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) para obtenção de tâmara passa.** Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, 1998. 149p. (Tese de Doutorado)

PRADO, M.E.T.; ALONSO, L.F.T.; PARK, K.J. **Isotermas de sorção de modelos matemáticos.** *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. Campinas, v.19, n.1, p.143-146, 1999.

PRADO, M.E.T.; PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T. Estudo do processo de secagem de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) da variedade Zahidi para obtenção do coeficiente de difusão. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, *Anais...*, Fortaleza, CE, 2000.

QUEIROZ, M.R., NEBRA, S.A. Modelo de difusão aplicado à secagem de banana: análise da condição de contorno convectiva. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE INGENIERIA DE ALIMENTOS, Campinas, **Anais...** Tomo II, p.301-311, 1995.

QUEIROZ, M.R., NEBRA, S.A. Theoretical and experimental analysis of the drying Kinetics of bananas, **Drying' 96**, p.1045-1052, 1996.

RODRIGUES, J.A.S.; PINHEIRO, R.V.R.; MANICA, I.; CASALI, V.W.D.; CONDÊS, A.R. Comportamento de 10 variedades de manga (*Mangifera indica* L.) em Viçosa e Visconde do Rio Branco. **Ceres**. Minas Gerais, v.24, n.136, p.580-595, 1977.

SANCHEZ, C.V. **Modelagem e predição de atividade de água em fluidos alimentícios**. Campinas: UNICAMP. 1994 (Exame de qualificação de área).

SCHIRMER, M.A.; JANJAI, S.; ESPER, A.; SMITABHINDU, R.; MUHLBAUER, W. Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas. **Renewable Energy**, v.7, n.2, p.11-129, 1996.

SILVA, M.M.; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C. Dessorção e calor isostérico em polpa de manga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v.6, n.1, p.123-127, 2002.

SPIESS, W.E.L.; WOLF, W.F. The results of cost go project on water activity. In: JOWITT, R. **Physical Properties of Foods**. London and New York: Applied Science Publisher, 1983. p.65-91.

STATISTICA for Windows 5.0. Computer program manual. Statsoft Inc., 1995.

TRAVAGLINI, D.A.; NETO, M.P.; BLEINROTH, E.W.; LEITÃO, M.F.F. **Banana-passa: princípios de secagem, conservação e produção industrial**, Campinas: ITAL, 1993, 73p. (Manual Técnico 12)

VERGARA, F.; AMEZAGA, E.; BARCENAS, M.E.; WELTI, J. Analysis of the drying processes of osmotic dehydrated apple using the characteristic curve model. **Drying Technology**, New York, v.15, n.3 e 4, p.949-963, 1997.

VILLAR, C.G. **Estudo do desempenho de um secador convectivo de bandejas para a secagem de bananas: análise da influência das variáveis operacionais**. Campina Grande: UFPB, 1999. 75p (Dissertação de Mestrado)

VITALLI, A.A. Importância da atividade de água em alimentos. In: **Seminário sobre a atividade de água em alimentos**, v.1, Campinas, ITAL, 1987.

YOSHIDA, C.M.P.; MENEGALLI, F.C. Drying of supersweet corn. In: INTERNACIONAL DRYING SYMPOSIUM, 12, Noordwijkerhout. **Proceedings...** Elsevier, 2000.

# **APÊNDICE A**

A1. Cinética de secagem de banana prata no estágio maduro e velocidade do ar de secagem de 1,0 m.s<sup>-1</sup>

	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C
Tempo (h)	(adm) <sup>*</sup>	(adm) <sup>*</sup>	(adm) <sup>*</sup>	(adm) <sup>*</sup>
0	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	0,867	0,824	0,775	0,723
0,2	0,773	0,690	0,618	0,538
0,3	0,697	0,590	0,496	0,398
0,4	0,642	0,503	0,392	0,292
0,5	0,591	0,428	0,302	0,216
0,6	0,542	0,364	0,234	0,158
0,7	0,457	0,252	0,130	0,079
0,8	0,391	0,172	0,080	0,043
1	0,331	0,117	0,052	0,027
1,5	0,197	0,048	0,026	0,010
2	0,099	0,025	0,015	0,005
2,5	0,056	0,016	0,010	0,000
3	0,032	0,008	0,006	
3,5	0,021	0,007	0,004	
4	0,016	0,003	0,003	
4,5	0,011	0,003	0,001	
5	0,008	0,001	0,000	
5,5	0,005	0,000		
6	0,003			
6,5	0,000			

\*adimensional de umidade =  $(x-x_c) / (x_0-x_c)$

**A2. Cinética de secagem de banana prata no estágio maduro e velocidade do ar de secagem de  $2,0 \text{ m.s}^{-1}$**

	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C
Tempo (h)	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
0	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	0,800	0,762	0,687	0,692
0,2	0,686	0,617	0,490	0,431
0,3	0,606	0,491	0,329	0,305
0,4	0,541	0,369	0,224	0,192
0,5	0,484	0,297	0,134	0,116
0,6	0,431	0,227	0,063	0,071
0,7	0,348	0,129	-0,034	0,056
0,8	0,264	0,077	-0,075	0,024
1	0,206	0,050	-0,097	0,018
1,5	0,089	0,022	-0,115	0,011
2	0,044	0,013	-0,123	0,004
2,5	0,026	0,006	-0,127	0,001
3	0,018	0,003	-0,127	0,000
3,5	0,012	0,000		
4	0,007			
4,5	0,005			
5	0,003			
5,5	0,001			
6	0,000			

\*adimensional de umidade =  $(x-x_c) / (x_0-x_c)$

A3. Cinética de secagem de banana prata semiverde e velocidade do ar de secagem de 1,0 m.s<sup>-1</sup>

	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C
<b>Tempo (h)</b>	<b>(adm)*</b>	<b>(adm)*</b>	<b>(adm)*</b>	<b>(adm)*</b>
0	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	0,859	0,820	0,774	0,731
0,2	0,756	0,699	0,634	0,541
0,3	0,676	0,603	0,519	0,400
0,4	0,609	0,516	0,421	0,285
0,5	0,552	0,434	0,331	0,186
0,6	0,499	0,363	0,250	0,113
0,7	0,408	0,241	0,121	0,026
0,8	0,332	0,141	0,041	0,005
1	0,281	0,082	0,010	0,004
1,5	0,113	0,012	0,000	0,000
2	0,032	0,003	0,000	0,000
2,5	0,006	0,002		
3	0,001	0,000		
3,5	0,000	0,000		
4	0,000			

\*adimensional de umidade =  $(x-x_e) / (x_o-x_e)$

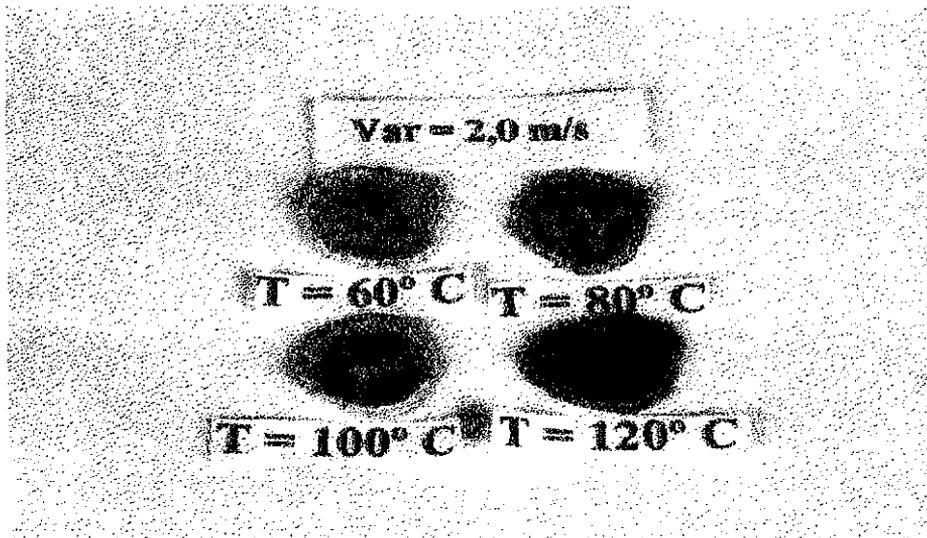
A4. Cinética de secagem de banana prata semiverde e velocidade do ar de secagem de 2,0 m.s<sup>-1</sup>

	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C
<b>Tempo (h)</b>	<b>(adm)<sup>*</sup></b>	<b>(adm)<sup>*</sup></b>	<b>(adm)<sup>*</sup></b>	<b>(adm)<sup>*</sup></b>
0	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	0,859	0,794	0,734	0,669
0,2	0,756	0,660	0,559	0,475
0,3	0,676	0,549	0,426	0,325
0,4	0,609	0,474	0,322	0,205
0,5	0,552	0,377	0,235	0,122
0,6	0,499	0,310	0,162	0,064
0,7	0,408	0,204	0,073	0,011
0,8	0,332	0,125	0,031	0,002
1	0,281	0,075	0,015	0,000
1,5	0,113	0,014	0,002	0,000
2	0,032	0,002	0,000	
2,5	0,006	0,001	0,000	
3	0,001	0,000		
3,5	0,000	0,000		
4	0,000			

\*adimensional de umidade =  $(x-x_c) / (x_0-x_c)$

## **APÊNDICE B**

**B.1.** Fotografia da banana prata no estágio maduro obtida após a secagem no secador de leito fixo, para as temperaturas de 60, 80, 100 e 120 °C com velocidade de 2,0 m.s<sup>-1</sup>.



**B.2.** Fotografia da banana prata semiverde obtida após a secagem no secador de leito fixo, para as temperaturas de 60, 80, 100 e 120 °C com velocidade de 2,0 m.s<sup>-1</sup>.

