

MODELOS MATEMÁTICOS PARA AJUSTE DAS ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DA POLPA DE BANANA DA VARIEDADE PRATA¹

JOSIVANDA P. G. DE GOUVEIA², JUCILENE DO NASCIMENTO³, FRANCISCO DE A. C. ALMEIDA², MANASSÉS M. DA SILVA³, ELIANA DA S. FARIAS³, FLÁVIO L.H. DA SILVA²

RESUMO: O presente trabalho teve por objetivo estudar as isotermas de dessorção da polpa de banana nos estádios madura e semiverde (*Musa acuminata* L.) da variedade Prata, para as temperaturas de 20; 30 e 40 °C pelo método gravimétrico estático, na faixa de atividade de água de 0,48 a 0,81. 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). Os modelos que apresentaram o menor erro relativo (E) e o maior coeficiente de determinação (R^2), foram os de Oswin e GAB, respectivamente. O de GAB foi escolhido por ser triparamétrico, o que permite melhor ajuste dos dados até a atividade de água de 0,9.

PALAVRAS-CHAVE: *Musa acuminata*, isotermas de dessorção, atividade de água.

MATHEMATICAL MODELS FOR ADJUSTMENT OF DESORPTION ISOTHERMS OF BANANA VARIETY SILVER

SUMMARY: The present work had for objective to study desorption isotherms of the pulp of banana in the mature and semigreen stadium (*Musa acuminata*) of the Silver variety, at temperatures of 20; 30 and 40 °C for static gravimetric method in the band water activity from 0.48 to 0.81. The experimental curves that were fitted for no-linear regression, for models of BET, GAB, Halsey and Oswin, choosen the best, by means of the value of the determination coefficient (R^2) and relative average error (E). Models had presented minor relative error (E) and the biggest determination coefficient (R^2) that respectively were of Oswin and GAB. The GAB was picked out to be triparametric, which lets a better adjustment of curves up to water activities to 0.9.

KEYWORDS: *Musa acuminata*, desorption isotherms, water activity.

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 complementar à da 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, essa atividade se torna economicamente viável. No Brasil, tem a característica de ser plantada em quase todos os municípios, em maior ou menor quantidade, o que o

¹ Parte da Dissertação de Mestrado do segundo autor.

² Prof. Dr., Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, e-mail: josi@deag.ufcg.edu.br

³ Mestrando em Engenharia Agrícola, CCT/COPEAG/UFCG, e-mail: manasses.m.s@bol.com.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 11-3-2003

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 14-10-2004

torna um dos maiores produtores. Mas, apesar de sua posição no *ranking* mundial, enfrenta um grande problema de aproveitamento pós-colheita, devido, principalmente, às más condições de colheita, processamento e comercialização (LIMA, 1999).

Segundo TODA FRUTA (2001), a área colhida com banana no Brasil manteve-se praticamente inalterada no período de 1994 a 2001, em torno de 520 mil hectares. No entanto, a produção passou de 7,1 milhões de toneladas para 6,7 milhões de toneladas. Possivelmente, ocorreu menor produção em algumas regiões por aspectos climáticos. A região Sudeste contribuiu com 32,8% da produção total em 2001, seguida pela Nordeste, Norte, Sul e Centro-Oeste com 27,6; 20,9; 10,7 e 8%, respectivamente. Com relação à área colhida, a região Nordeste participou com 32,7% da área total, seguida pelo Sudeste com 28,2%, Norte com 23,1%, Centro-Oeste com 8,5% e Sul com 7,5 do total da área colhida.

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 e, por isso, haverá, sempre que se justifique, recomendação específica para uma cultivar ou uma localidade diferente.

Com a necessidade de ampliar os estudos na área de secagem com essa frutífera, o Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande 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. Esse processo é uma combinação entre transferência de calor e massa, com o que se reduz a disponibilidade de água e o crescimento microbiano, assim como 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. Pelo fato de a banana ser um material com alta umidade, ela pode perder ou ganhar umidade para o ambiente, até atingir o equilíbrio. Desse modo, é importante o estudo do equilíbrio higroscópico, uma vez que determina o teor de água mínimo que o produto pode atingir sob determinadas condições de secagem.

Diante do exposto, este trabalho teve o objetivo de estudar, experimentalmente, as isotermas de dessorção de polpa de banana a 20; 30 e 40 °C, utilizando-se do método estático indireto.

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.

A polpa de banana da variedade Prata (*Musa acuminata* L.), nos estádios madura (amarela) e semiverde (verde + faixa amarela), segundo Moreira (1999), foi adquirida no comércio local de Campina Grande, procedente de pomares de produtores da região da Paraíba. Para a determinação das isotermas de dessorção da polpa de banana, foi utilizado o equipamento *Termoconstanter Novasina TH 200*, projetado para medir a atividade de água sob temperatura controlada. Nesse equipamento, a temperatura da câmara de medição é regulada para uma variação menor que 0,2 °C, no intervalo de 0 a 50 °C. Essa câmara é um minigabinete climático, equipado com sensores de umidade e temperatura.

As isotermas de dessorção foram determinadas pelo método estático-indireto, com base no estudo efetuado por CAPRISTE e ROTSTEIN (1982). Inicialmente, 7,0 g de amostra, na forma de cubos, eram colocados em célula plástica que acompanha o equipamento e pesados em balança analítica, com precisão de 0,0001 g. Em seguida, a amostra era levada a secagem de três horas, a 60 °C, em estufa de circulação forçada de ar. Após esse período, a amostra era retirada da estufa e

colocada no dessecador. A célula plástica, contendo a amostra, era levada ao *Thermoconstanter Novasina TH-200*, no qual se realizava a determinação da atividade de água (a_w), à temperatura de 20; 30 e 40 °C.

A amostra ficava no equipamento até que a leitura da atividade de água se estabilizasse; em seguida, era retirada, pesada em balança analítica e colocada na estufa durante 15 minutos, antes de efetuar nova leitura. Esse 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 60 °C, durante 24 h, para a determinação da massa seca (Figura 1).

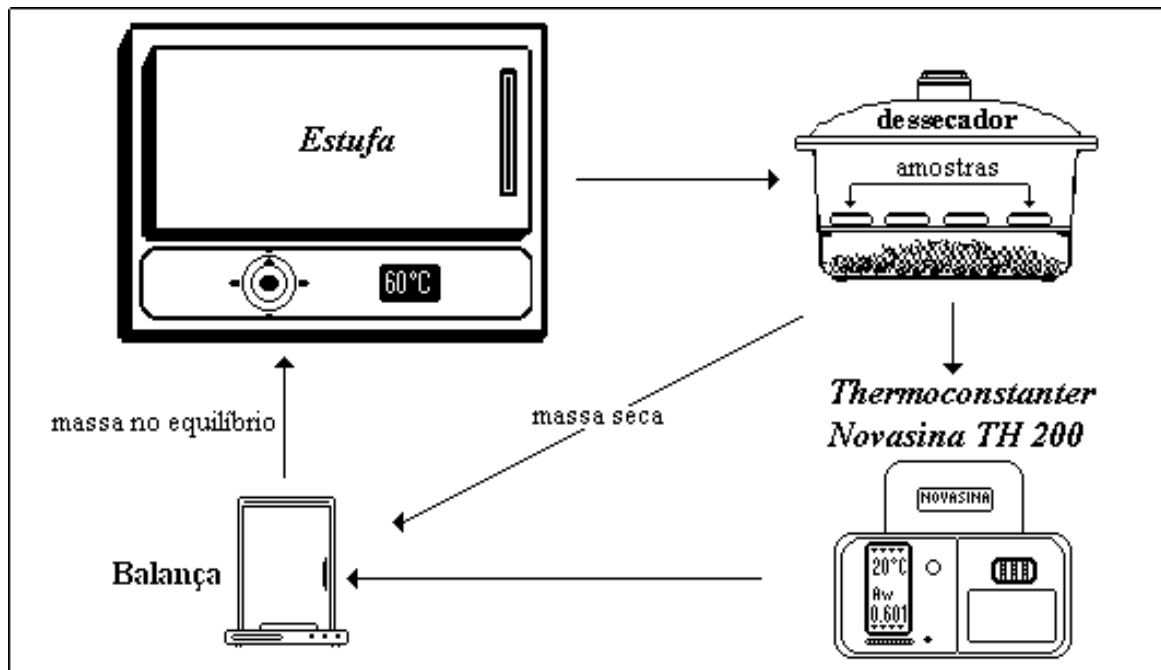


FIGURA 1. Determinação da atividade de água.

A umidade de equilíbrio foi calculada pela diferença entre a massa que a amostra apresentou no equilíbrio e a sua massa seca [eq.(1)].

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (1)$$

em que,

- X_e - umidade de equilíbrio, b s;
- m_{eq} - massa da amostra no equilíbrio, g, e
- m_s - massa da amostra seca, g.

Para o ajuste das isotermas de dessecção da polpa de banana, mediante análise de regressão não-linear dos dados obtidos, foram testados os modelos de BET [eq.(2)], GAB [eq.(3)], Halsey [eq.(4)] e Oswin [eq.(5)], empregando-se o programa computacional Statistica versão 5.0, com critérios de convergência de 0,0001.

BET

$$X_e = \frac{x_m C a_w}{1 - a_w} \left[\frac{1 - (n + 1) (a_w)^n + n (a_w)^{n+1}}{1 - (1 - C) a_w - C (a_w)^{n+1}} \right] \quad (2)$$

GAB

$$X_e = \frac{x_m CKa_w}{(1 - K_{aw})(1 - K_{aw} + CK_{aw})} \quad (3)$$

Halsey

$$a_w = \exp\left(\frac{-a}{X_e^b}\right) \quad (4)$$

Oswin

$$X_e = a \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^b \quad (5)$$

em que,

a_w - atividade de água, adimensional;

X_e - umidade de equilíbrio, b s;

n - número de camadas moleculares;

x_m - conteúdo de umidade na monocamada molecular, kg kg⁻¹;

C - constante de BET que está relacionada ao calor de sorção da camada molecular, e

a , b e K - constantes de ajuste do modelo.

Com base na eq.(6), LOMAURO et al. (1985) consideram que valores com erro relativo médio abaixo de 10% indicam um razoável ajuste para as práticas propostas.

$$E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(M_i - Mp_i)|}{M_i} \quad (6)$$

em que,

E - erro médio relativo;

M_i - valores obtidos experimentalmente;

Mp_i - valores preditos pelo modelo, e

n - número de dados experimentais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais da atividade de água (a_w) com suas respectivas umidades de equilíbrio (X_e) a diferentes temperaturas, mostradas na Tabela 1, referem-se à dessorção da polpa de banana da variedade Prata, nos estádios madura e semiverde.

Verifica-se que o conteúdo de umidade de equilíbrio varia com as mudanças de temperatura. Estes resultados encontraram apoio no trabalho de SILVA et al. (2002), ou seja, a polpa de manga entra em equilíbrio higroscópico com valores de umidade de equilíbrio distintos, dependendo da temperatura a que foram submetidas. Observa-se, de forma geral, que a umidade de equilíbrio para a polpa de banana variedade Prata, no estádio madura, é sempre menor que no semiverde.

Na Tabela 2, 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 da polpa de banana 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 2, 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 polpa de banana madura. Resultado semelhante ocorreu na determinação de umidade em monocamada do referido modelo, para as isotermas de dessecção da polpa de goiaba (ARAÚJO et al., 2002). Para a polpa de banana semiverde, o conteúdo de umidade da camada monomolecular (x_m), nesse modelo, aumentou com a temperatura. O parâmetro C do referido modelo para a polpa de banana, nos dois estádios, decresceu com o aumento da temperatura, o que é concordante com MOURA et al. (2001), que trabalharam com secagem de caju e concluíram que o valor do parâmetro C do modelo de GAB diminui com o aumento da temperatura.

Com base nesses resultados, verifica-se que as constantes das equações variaram com a temperatura e os estádios de maturação da polpa de banana, e 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%. Observa-se que o maior erro médio relativo se deu para a polpa de banana no estádio madura (BET a 20 °C) e para a polpa de banana semiverde (Halsey a 30 °C) tendo este sido de 8,10 e 6,49%, respectivamente.

Para a polpa de banana no estádio madura, 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 dessecção desse produto. Resultado similar foi encontrado por ARAÚJO et al. (2002) ao estudarem isotermas de dessecção de goiaba, enquanto para a polpa de 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 dessecção para a temperatura de 40 °C.

TABELA 1. Valores experimentais de atividade de água e umidade de equilíbrio de banana variedade Prata nos estádios madura e semiverde para as temperaturas 20; 30 e 40 °C.

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

TABELA 2. Parâmetros de ajuste das isotermas de dessecção de polpa de banana nos estádios madura e semiverde para os diferentes modelos matemáticos estudados.

Modelos	Temperatura	Maturação	Parâmetros			R ² (%)	E (%)
			x _m	C	n		
BET	20 °C	Madura	0,280	0,378	18	98,20	8,10
		Semiverde	0,353	0,204	18	98,44	2,79
	30 °C	Madura	19,397	0,002	18	99,94	7,41
		Semiverde	0,324	0,125	18	97,66	4,98
	40 °C	Madura	4,105	0,006	18	99,29	7,74
		Semiverde	0,169	0,262	18	99,31	2,36
GAB	20 °C	Madura	0,142	1,251	1,052	98,79	7,72
		Semiverde	0,076	2,843	1,154	98,83	2,64
	30 °C	Madura	2,869	0,012	1,004	99,40	7,71
		Semiverde	1,362	0,034	0,934	97,56	5,52
	40 °C	Madura	1,673	0,014	1,005	99,68	5,52
		Semiverde	1,477	0,032	0,901	99,32	2,33
Halsey	20 °C	Madura	0,185	0,756		98,71	7,83
		Semiverde	0,193	0,623		98,65	2,41
	30 °C	Madura	0,189	0,489		99,36	7,94
		Semiverde	0,144	0,632		97,33	6,49
	40 °C	Madura	0,156	0,498		99,67	5,63
		Semiverde	0,143	0,595		99,08	2,71
Oswin	20 °C	Madura	0,164	1,122		98,69	7,54
		Semiverde	0,121	1,333		98,56	2,64
	30 °C	Madura	0,067	1,660		99,63	6,21
		Semiverde	0,076	1,362		97,49	5,67
	40 °C	Madura	0,044	1,732		99,75	4,15
		Semiverde	0,069	1,131		99,32	2,35

De acordo com os resultados dos valores do coeficiente de determinação (R²) e do erro médio relativo (E), todos os modelos testados descreveram satisfatoriamente as isotermas de dessecção da polpa da banana, nos dois estádios de maturação, uma vez que seus coeficientes ficaram acima de 97,33% e o erro médio relativo inferior ou igual a 8,1%. No entanto, a melhor representação matemática das isotermas de dessecção da polpa de banana foi obtida por meio do modelo de GAB, uma vez que apresentou maiores valores de coeficiente de determinação (R²) e menores valores de erro médio relativo (E). KIRANOUDIS et al. (1997) sugeriram o modelo de GAB para representar as isotermas de maçã, pêra, kiwi e banana. KECHAOU e MAALEJ (1999) verificaram que esse modelo também representou satisfatoriamente as isotermas de dessecção de polpa de banana a 35; 50 e 70 °C e a atividade de água de 0,00 a 0,90.

As isotermas de dessecção da banana no estádio madura e semiverde, para as temperaturas de 20; 30 e 40 °C (Figuras 2 e 3), evidenciam que o aumento da atividade de água (a_w) resulta em aumento da umidade de equilíbrio, sob todas as temperaturas estudadas.

A taxa de dessecção é mais alta no início do processo, principalmente devido à facilidade de redução da umidade. Esses resultados também foram observados por ADAM et al. (2000) ao estudarem isotermas de sorção de cebola.

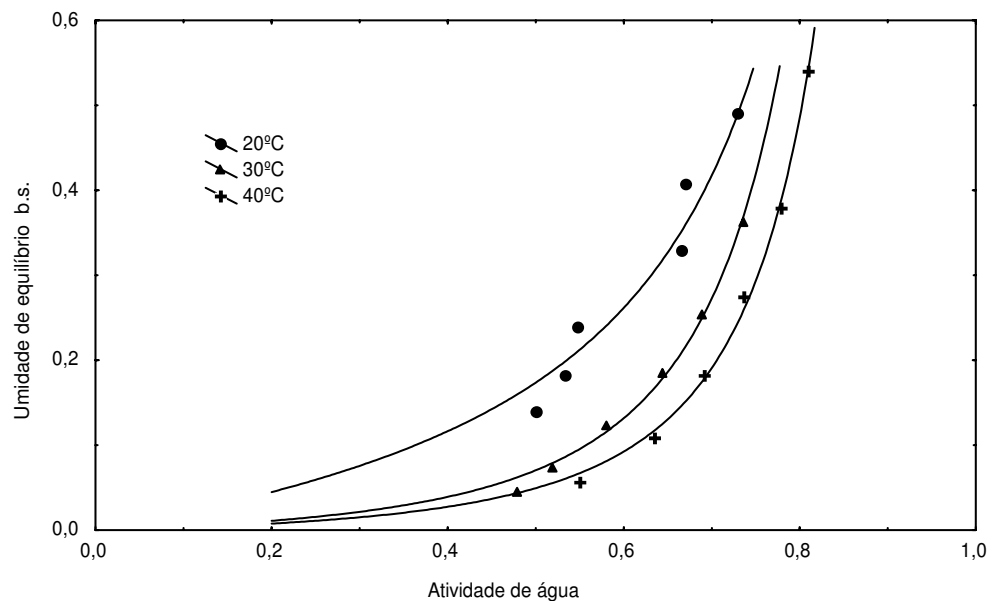


FIGURA 2. Isotermas de dessecção da polpa de banana da variedade Prata madura, nas três temperaturas, e ajustadas pelo modelo de GAB.

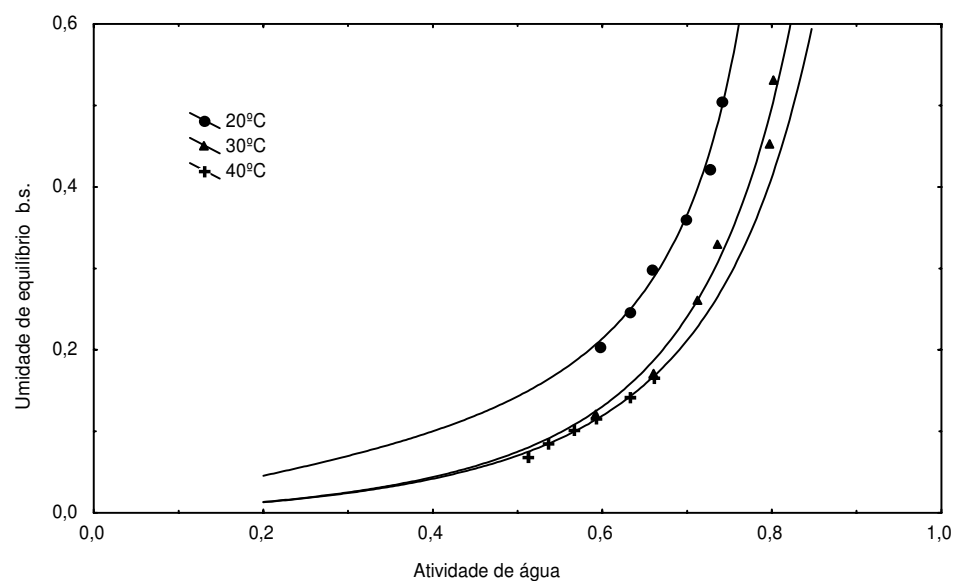


FIGURA 3. Isotermas de dessecção da polpa de banana da variedade Prata semiverde, sob três temperaturas, e ajustadas pelo modelo de GAB.

CONCLUSÕES

Os modelos matemáticos de GAB, Oswin, BET, Halsey e Oswin podem descrever satisfatoriamente as isotermas de dessecção de polpa de banana da variedade Prata nos estádios madura e semiverde.

As amostras de polpa de banana entram em equilíbrio higroscópico com valores distintos, dependendo da temperatura a que foram submetidas.

REFERÊNCIAS

- 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*, New York, v.18, n.9, p.2117-129, 2000.
- ARAÚJO, M.E.R.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G.; SILVA, M.M. Avaliação da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.4, n.1, p.141-9, 2002.
- CAPRISTE, G.H.; ROTSTEIN, E. Prediction of sorption equilibrium data for starch-containing foodstuffs. *Journal of Food Science*, Chicago, v.47, p.1501-107, 1982.
- 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.1399-418, 1997.
- KECHAOU, N.; MAALEJ, M. Desorption isotherms of imported banan. *Drying Technology*, New York, v.17, n.6; p.1201-13, 1999.
- LIMA, A.G.B. *Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos*. Estudo de caso: secagem de banana. 1999. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Moisture transfer properties of dry and semi moist foods. *Journal of Food Science*, Chicago, v.50, n.5, p.397-400, 1985.
- MOREIRA, R.S. *Banana: teoria e prática de cultivo*. 2. ed. São Paulo: Fundação Cargill, 1999. 1 CD ROM.
- 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: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. *Anais...* Cascavel: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1 CD ROM.
- 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, v.6, n.1, p.123-7, 2002.
- TODA FRUTA. Informações econômicas sobre a banana. Disponível em: <<http://www.todafruta.com.br>>. Acesso em: 30 nov. 2003.