

# SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE ABACAXI EM FATIAS EM SECADOR DE LEITO FIXO

Ester Rodrigues<sup>1</sup>, Jadir Nogueira da Silva<sup>2</sup>, Cristiano Márcio Alves de Souza<sup>3</sup>, Adílio Flauzino de Lacerda Filho<sup>4</sup>, Modesto Antonio Chaves<sup>5</sup>

## RESUMO

A modelagem matemática é uma importante ferramenta para representar e analisar o comportamento da cinética de secagem de produtos agrícolas. Neste trabalho objetivou-se implementar o modelo de Thompson (1968) de simulação no processo de secagem de abacaxi em fatias validando-o por meio da comparação entre os resultados simulados e experimentais. Utilizou-se um secador de leito fixo, com ventilador potência de 373 w e fornecimento complementar de energia para o ar de secagem por meio de resistências elétricas. Para a secagem utilizou-se as temperaturas de 60, 65 e 70 °C e velocidades do ar de 0,50; 0,75 e 1,00 m s<sup>-1</sup>. O modelo proposto por THOMPSON et al. (1968) implementado para simular a secagem de abacaxi em fatias, com um erro relativo médio observado de 7,3%, mostrou-se com precisão satisfatória para simular o processo, podendo ser utilizado para prever o tempo e as condições de secagem.

**Palavras-chave:** modelo de Thompson, secagem em camada fixa.

## ABSTRACT

### Simulation Of Fixed-Bed Drying Of Pineapple Slices

The mathematical modeling is an important tool to show and analyze the kinetic behavior of drying agricultural products. This study was done to use the Thompson's (1968) model to simulate drying process of pineapple slices and validating it by comparing the simulated and experimental results. A fixed bed dryer fitted with a 373 w fan and electric resistances to supplement heating of the drying air was used. The drying was done at 60, 65 and 70 °C with air velocity of 0.50; 0.75 and 1.0 m s<sup>-1</sup>. The Thompson's model showed an error 7.3% relative to the mean of observed values, therefore was considered satisfactory to simulate the process. The data showed that this model can be used to predict the time and conditions of drying pineapple slices.

**Keywords:** Thompson' model, fixed bed drying.

---

Recebido para publicação em 21.07.2008

<sup>1</sup> Eng. Agrícola, Doutora em Engenharia Agrícola, e-mail: [esterrodrigues15@yahoo.com.br](mailto:esterrodrigues15@yahoo.com.br).

<sup>2</sup> Bacharel em Matemática, Prof. Titular, Depto de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, email: [jadir@ufv.br](mailto:jadir@ufv.br)

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Prof. Adjunto, Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, email: [csouza@ufgd.edu.br](mailto:csouza@ufgd.edu.br)

<sup>4</sup> Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, Depto de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa e-mail: [alacerda@ufv.br](mailto:alacerda@ufv.br)

<sup>5</sup> Eng. Agrícola, Prof Adjunto, UESB – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, e-mail: [modesto@uesb.br](mailto:modesto@uesb.br)

## INTRODUÇÃO

Vários modelos foram propostos para prever o comportamento da secagem de produtos agrícolas, por esses se apresentarem como uma importante ferramenta para o profissional da área (SOUZA et al., 2002). Para descrever o processo de secagem no período de taxa decrescente, utilizam-se modelos teóricos, semi-empíricos e empíricos, que são baseados no fenômeno de transferência de calor e de massa.

Os modelos empíricos e semi-empíricos são baseados na lei de Newton, para o resfriamento, aplicados à transferência de massa. Quando se aplica essa lei, presume-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja à superfície (BABALIS & BELESSIOTIS, 2004).

O estabelecimento de curvas de equilíbrio higroscópico é importante para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças de umidade sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar ambiente e para definir os teores de umidade propícios ao início de atividade de agentes que irão provocar a deterioração do produto. É importante ressaltar que, no caso do abacaxi, as condições de secagem e o armazenamento adequado são essenciais para manter a qualidade desse produto devido a sua elevada atividade de água.

Estudos sobre a movimentação de umidade no interior de produtos submetidos ao processo de secagem revelaram que, o transporte de umidade ocorre por difusão de líquido ou difusão de vapor ou, ainda, pela combinação destes mecanismos, predominando um ou outro durante a secagem (ALVARENGA et al., 1980). Entretanto, FORTES e OKOS (1981) afirmaram que em determinada fase da secagem, o movimento de umidade é, basicamente, determinado pela difusão de líquido.

De acordo com NICOLETI (2001), os principais fatores que afetam a taxa de secagem são as propriedades físicas do produto, o arranjo geométrico do produto em relação à superfície de transferência de calor, as propriedades físicas do ambiente de secagem e a característica do equipamento de secagem. Dos fatores citados, o que mais influencia a taxa de secagem é a natureza da matéria prima, compreendendo a constituição química e física das paredes das células.

Dentre os problemas encontrados durante a secagem têm-se a complexidade da composição e estrutura do alimento e, mais especificamente, os coeficientes de transferência de calor e massa, bem como, as propriedades termodinâmicas do alimento. Estas propriedades estão em função da temperatura e umidade, o que torna a equação diferencial, resultante do novo sistema não linear e, somente neste caso, pode ser resolvida por métodos numéricos.

Vários pesquisadores utilizaram modelos matemáticos para descreverem a secagem de materiais biológicos: CONDE (2004) utilizou o modelo de Page e adaptou-o ao modelo de Thompson para a secagem de cenoura. FIOREZE e MORINI (2000) utilizaram o modelo de Thompson para a secagem de inhame. SILVA (2000) relatou a adaptação de um programa de computador baseado no modelo de Thompson para simular a secagem de raspa de mandioca. O modelo de Fick foi utilizado por TOGRUL & PEHLIVAN (2004) para prever a secagem de uva, pêssego, figo e ameixa; HAWLADER et al. (1991) para tomates e BABALIS & VELSSIOTIS (2004) para figos.

Considerando as condições pelas quais o produto passa durante o processo de secagem, objetivou-se com esse trabalho, implementar um modelo de simulação para prever a secagem de abacaxi em fatias, validando-o por meio da comparação de resultados simulados com experimentais.

## MATERIAL E MÉTODOS

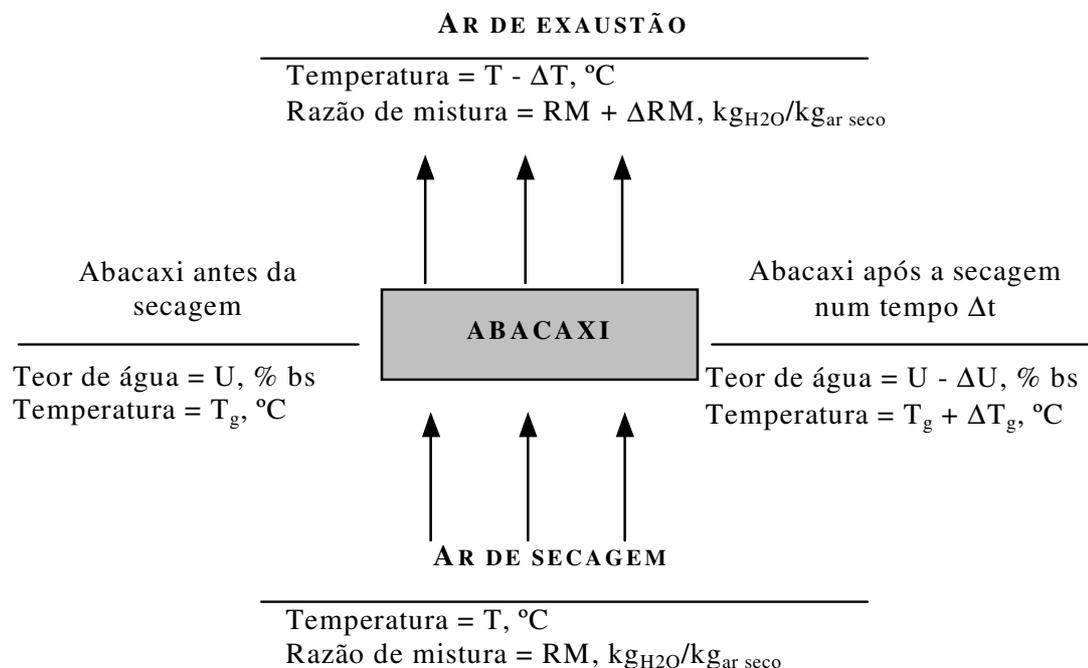
O trabalho foi realizado no Laboratório de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Vegetais do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Na secagem foram utilizados frutos de abacaxi (*Ananas comosus*), cultivar Pérola, com teor inicial de água de 86 % b.u.

Um programa computacional orientado a objetos, com interface do usuário amigável e flexível, foi desenvolvido para simular o processo de secagem de abacaxi. A linguagem de programação MS Visual Basic, versão 6, foi utilizada no desenvolvimento do programa computacional.

O modelo matemático da cinética de secagem de abacaxi foi implementado com base no proposto por THOMPSON et al. (1968). No modelo, foi utilizado como artifício, a divisão do processo de secagem em vários subprocessos. O leito de produto foi considerado como formado por várias camadas de fatias de abacaxi com espessuras reduzidas,

colocadas umas sobre as outras. As variações nas condições do ar e da fatia, em cada camada, foram calculadas com base em pequenos incrementos de tempo.

Na Figura 1, está apresentado um esquema ilustrando como ocorreram as variações consideradas na simulação de secagem de uma camada de espessura reduzida, que compõe um leito de produto a ser secado. Quando o ar passa pela camada fina, durante determinado intervalo de tempo, certa quantidade de água do produto é evaporada, sendo absorvida pelo ar. Nesse intervalo, a temperatura do ar diminui, em consequência da transferência de calor sensível do ar para o aquecimento do abacaxi, e do calor latente fornecido para evaporação parcial da água do produto. A quantidade de água perdida pelo produto é calculada por meio de uma equação empírica de secagem em camada delgada. As temperaturas finais do ar e do abacaxi, consistentes com o resfriamento evaporativo, são obtidas por meio de balanços de energia.



**Figura 1:** Esquema das variações decorrentes do processo de secagem em camada delgada durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ .

No desenvolvimento do modelo foram feitas as seguintes suposições: a secagem de uma camada delgada de produto pode ser descrita por uma equação obtida empiricamente; a temperatura da fatia é igual à temperatura do ar que a envolve após os balanços de energia, levando-se em conta, o resfriamento proveniente da evaporação da água do produto, as temperaturas das fatias e do ar; o teor de água de equilíbrio das fatias depende da temperatura e da umidade relativa do ar nas vizinhanças destas; a entalpia de vaporização da água nas fatias é constante; a entalpia específica do produto depende do teor de água.

Para modelar a secagem da camada de fatias de abacaxi foram utilizados os procedimentos propostos por SOUZA et al. (2002). Foram executados os seguintes passos: cálculo da umidade de equilíbrio entre o ar e produto; cálculo da umidade de equilíbrio do produto; cálculo do tempo equivalente; cálculo da razão de umidade do produto; cálculo da umidade do produto no tempo  $t + \Delta t$ ; cálculo da razão de umidade; cálculo das temperaturas finais do ar e do produto; verificação da consistência dos valores de temperatura final e razão de mistura do ar de saída.

Para o cálculo da temperatura de equilíbrio entre o ar e o produto, foi considerada somente a troca de calor sensível. Para esta determinação, faz-se necessário o seguinte balanço de energia (Equação 1)

$$0,24 \cdot T_0 + W_0 \cdot (588 + 0,45 \cdot T_0) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{g0} = 0,24 \cdot T_e + W_0 \cdot (588 + 0,45 \cdot T_e) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{ge} \quad (1)$$

em que,

$T_0$  = Temperatura do ar na entrada da camada de produto, °C;

$W_0$  = Razão de mistura do ar na entrada da camada do produto, kg de vapor d'água por kg de ar seco;

$T_{g0}$  = Temperatura do produto no instante  $t$ , °C;

$T_e$  = temperatura do ar em equilíbrio com o produto, °C;

$T_{ge}$  = temperatura do produto em equilíbrio com o ar, °C;

$U$  = teor de água do produto no tempo  $t$ , decimal b.s.;

$C_p$  = entalpia específica do abacaxi,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ; e

$R$  = razão entre a massa de matéria seca da camada de produto e a massa de ar seco que passa no intervalo de tempo  $\Delta t$ ,  $\text{kg kg}^{-1}$ .

Admitindo-se que a temperatura da fatia era igual à temperatura do ar que o envolve, tem-se a Equação 2

$$T_{ge} = T_e \quad (2)$$

A razão entre as massas de matéria seca e de ar seco foi determinada por meio da Equação 3

$$R = \frac{P \cdot v_e \cdot A \cdot \Delta x}{Q \cdot \Delta t \cdot 60 \cdot (1 + U_0)} \quad (3)$$

em que,

$U_0$  = teor de água inicial do produto, decimal b.s.;

$\Delta x$  = espessura da camada do produto, m;

$\Delta t$  = incremento de tempo, h;

$P$  = massa específica do produto no início da secagem,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$Q$  = vazão de ar,  $\text{m}^3 \text{ min}^{-1}$ ;

$A$  = área da seção transversal,  $\text{m}^2$ ; e

$V_e$  = volume específico do ar,  $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$ .

A entalpia específica do abacaxi foi obtida de MOHSENIN (1980), sendo  $3.6844 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

A temperatura de equilíbrio entre o ar de secagem e o produto foi determinada, conforme descrito por meio da equação de balanço de calor, pela Equação 4, THOMPSON et al. (1968)

$$T_e = \frac{(0,24 + 0,45 \cdot RU) \cdot T_0 + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{g0}}{0,24 + 0,45 \cdot RU + C_p \cdot R \cdot (1 + U)} \quad (4)$$

em que,

$RU$  = Razão de umidade, adimensional.

Para calcular a umidade de equilíbrio do produto foi necessário determinar, primeiramente, a umidade relativa do ar. Para isso, foi utilizada a Equação 5, apresentada por BROOKER et al. (1992)

$$U_r = \frac{100 \cdot P_{atm} \cdot W_0}{(0,622 + W_0) \cdot P_{vs}} \quad (5)$$

em que,

$U_r$  = Umidade relativa do ar, %;

$P_{atm}$  = Pressão atmosférica, kPa;

$P_{vs}$  = Pressão de vapor de saturação do ar, à temperatura  $T_e$ , kPa; e

$W_0$  = Razão de mistura do ar na entrada da camada do produto, kg de vapor d'água por kg de ar seco.

A pressão de vapor de saturação do ar foi determinada utilizando-se a Equação 6, recomendada por ASAE Standard D271.2 (ASAE, 1998)

$$T_e - 255,38 = \sum_{i=0}^8 A_i [\ln(0,00145P_{vs})]^i \quad (6)$$

em que,

$$A_0 = 19,5322;$$

$$A_1 = 13,6626;$$

$$A_2 = 1,1768;$$

$$A_3 = -0,1897;$$

$$A_4 = 0,08745;$$

$$A_5 = -0,01741;$$

$$A_6 = 0,0021477;$$

$$A_7 = -0,1383 \cdot 10^{-3}; e$$

$$A_8 = 0,38 \cdot 10^{-5}.$$

Para o cálculo do teor de água de equilíbrio utilizou-se o modelo de GAB (Equação 7), com os parâmetros para o abacaxi, obtidos por NICOLETI (2001)

$$U = \frac{(C-1)K_3 a_w X_m}{1 + (C-1)K_3 a_w} + \frac{K_3 a_w X_m}{1 - k_3 a_w} \quad (7)$$

em que,

U = Teor de umidade de equilíbrio, decimal b.s.

C = Constante de Guggenheim;

K<sub>3</sub> = Constante

aw = Atividade de água; e

X<sub>m</sub> = Conteúdo de água na camada molecular, b.s.

Para o cálculo da constante de Guggenheim utilizou-se a Equação 8

$$C = c_0 \exp\left(\frac{(H_m - H_n)}{RT}\right) \quad (8)$$

em que,

H<sub>m</sub> = Entalpia específica de sorção da primeira camada, kJ mol<sup>-1</sup>;

H<sub>n</sub> = Entalpia específica de sorção das multicamadas, kJ mol<sup>-1</sup>;

R = Constante universal dos gases = 8,314 x 10<sup>-3</sup>, kJ mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>;

T = Temperatura, K; e

c<sub>0</sub> = Constante = 5,26x 10<sup>4</sup>

Para o cálculo da constante K<sub>3</sub> utilizou-se a Equação 9

$$K_3 = k_0 \exp\left(\frac{(\lambda - H_n)}{RT}\right) \quad (9)$$

em que,

k<sub>3</sub> = Constante da equação 07

K<sub>0</sub> = constante da equação = 33,84

λ = calor de condensação da água pura, kJ mol<sup>-1</sup>

As constantes da Equação de GAB para o abacaxi são mostradas na Tabela 1

**Tabela 1:** Constantes da Equação de GAB para abacaxi

| Parâmetros do Modelo de GAB                                   | Temperatura °C |       |       |                       |
|---|----------------|-------|-------|-----------------------|
|   | 40             | 50    | 60    | 70                    |
| U % b.s.  | 81,79          | 13,19 | 6,33  | 6,37                  |
| C   | 0,132          | 0,526 | 1,110 | 0,850                 |
| C <sub>0</sub>  |                |       |       | 5,26x 10 <sup>4</sup> |
| ΔHc = (H <sub>m</sub> - H <sub>n</sub> ) kJ mol <sup>-1</sup> |                |       |       | -30,24                |
| K <sub>3</sub>  | 0,713          | 0,899 | 1,003 | 1,022                 |
| K <sub>0</sub>  |                |       |       | 33,84                 |
| ΔHk = (λ - H <sub>n</sub> ) kJ mol <sup>-1</sup>              |                |       |       | -9,66                 |

Fonte: NICOLETI (2001). Em que: U é o conteúdo de água na camada molecular, % b.s., C é a constante de Guggenheim, C<sub>0</sub> é uma constante, H<sub>m</sub> é a entalpia específica de sorção da primeira camada, kJ mol<sup>-1</sup>, H<sub>n</sub> é a entalpia específica de sorção das multicamadas, kJ mol<sup>-1</sup> k<sub>3</sub> é a constante da Equação 7, K<sub>0</sub> é a constante da Equação 8, λ é o calor de condensação da água pura, kJ mol<sup>-1</sup>.

O tempo equivalente é definido como o intervalo de tempo que o produto deveria ficar exposto às condições existentes, no tempo  $t$  ( $T_e$ ,  $W_0$ ), para que o teor de água fosse reduzido do valor inicial ( $U_0$ ) para o valor atual ( $U$ ). Para se determinar o tempo equivalente na secagem de abacaxi utilizou-se a Equação 10 (Equação de Lewis)

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} = \exp(-k \cdot t_{eq}) \quad (10)$$

em que,

$t_{eq}$  = Tempo de secagem, h; e

$k$  = Parâmetro dependente da temperatura do ar,  $s^{-1}$ .

Nas equações empíricas de secagem em camada delgada podem ocorrer outras variáveis; como o teor inicial de água do produto e/ou a velocidade do ar. Em algumas equações, o efeito da umidade relativa do ar é desprezado. A razão de umidade do produto foi calculada para o tempo  $t$ , conforme a Equação 11

$$RU_0 = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} \quad (11)$$

A razão de umidade do produto nas condições de ar  $T_e$  e  $W_0$ , durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , foi determinada pela equação empírica de secagem em camada

$$0,24 \cdot T_e + W_0 \cdot (588 + 0,45 \cdot T_e) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{ge} + (W_f - W_0) \cdot T_{ge} = 0,24 \cdot T_f + W_f \cdot (588 + 0,45 \cdot T_f) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{gf} + (W_f - W_0) \cdot \Delta L_v \quad (15)$$

em que,

$T_f$  = Temperatura do ar saindo da camada do produto,  $^{\circ}C$ ;

$T_{gf}$  = Temperatura do produto na camada no tempo  $t + \Delta t$ ,  $^{\circ}C$ ; e

$\Delta L_v$  = Entalpia de vaporização acima do valor para evaporação da água livre,  $kJ \cdot kg^{-1}$  de água.

A entalpia de vaporização da água no abacaxi foi obtida de MOHSENIN (1980), sendo seu valor de  $283,772 \text{ kJ} \cdot kg^{-1}$ .

O primeiro e o segundo termo de cada lado da Equação 15 representam as entalpias, inicial e final do ar. O terceiro termo de cada lado da equação representa a energia contida no produto, nos tempos  $t$  e

$$T_f = \frac{(0,24 + 0,45 \cdot W_0) \cdot T_e - (W_f - W_0) \cdot (588 + \Delta L_v - T_e) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_e}{0,24 + 0,45 \cdot W_f + C_p \cdot R \cdot (1 + U)} \quad (17)$$

delgada (Equação 12), conforme descrito em RODRIGUES, 2006

$$RU_f = f(T_e, UR, t_e + \Delta t) \quad (12)$$

em que,

$RU_f$  = Razão de umidade final do produto, adimensional.

A umidade do produto no tempo  $t + \Delta t$  foi determinada conforme a Equação 13

$$U_f = RU_f \cdot (U_0 - U_e) + U_e \quad (13)$$

em que,

$U_f$  = Teor final de água do produto na camada, no tempo  $t + \Delta t$ , decimal b.s.

A razão de mistura do ar, consistente com a perda de umidade do produto, foi determinada por um balanço de massa utilizando a Equação 14

$$W_f = W_0 + R \cdot (U - U_f) \quad (14)$$

em que,

$W_f$  = Razão de mistura do ar na saída da camada de abacaxi, kg de vapor d'água por kg de ar seco.

As temperaturas finais do ar e do produto foram determinadas por meio de um balanço de energia que leva em conta a perda de umidade do produto conforme Equação 15

$t + \Delta t$ . O quarto termo do lado esquerdo da igualdade representa a quantidade de energia contida na água, que está sendo retirada do produto. O último termo da equação representa a quantidade de energia adicional necessária para evaporar a água do produto, acima da quantidade necessária para evaporar a água livre.

Admitindo-se que a temperatura do produto é igual à do ar que a envolve, tem-se a Equação 16

$$T_{gf} = T_f \quad (16)$$

Explicitando  $T_f$  na Equação 16, obtém-se a Equação 17:

Efetuada os cálculos, é necessário verificar se o resultado obtido é factível. Em certos casos, podem-se obter resultados em que a umidade relativa do ar, determinada matematicamente, é superior a 100%. Se isso ocorrer, novos balanços de massa e de energia deverão ser

feitos, simulando a condensação de água no produto.

Nesses novos balanços, o ponto de estado  $T_f$  e  $W_f$ , não factível, serão corrigidos para o ponto de estado  $T_f^*$  e  $W_f^*$ . Esses novos balanços são representados pelas Equações 17 e 18.

$$0,24 \cdot T_f + W_f \cdot (588 + 0,45 \cdot T_f) + (W_f^* - W_f) \cdot T_f + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_f = 0,24 \cdot T_f^* + W_f^* \cdot (588 + 0,45 \cdot T_f^*) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_f^* \quad (18)$$

Na Equação 19, existem duas variáveis a serem determinadas,  $T_f^*$  e  $W_f^*$ . A outra condição usada para tornar possível a determinação do ponto de estado factível, é que a umidade relativa determinada matematicamente seja, no máximo, igual a 100%.

A quantidade de água condensada no produto faz com que o seu teor de água passe a ser  $U_f^*$  (Equação 19)

$$U_f^* = U_f - \frac{W_f^* - W_f}{R} \quad (19)$$

Selecionaram-se os frutos de abacaxi (*Ananas comosus*), variedade pérola, atendendo aos padrões comerciais de qualidade. Efetuou-se a pré-lavagem dos frutos com água potável e foram imersa em água clorada de concentração de 10 ppm de cloro, por dez minutos. Cortou-se o abacaxi em fatias de, aproximadamente, 0,01 m e estas foram cortadas em metades.

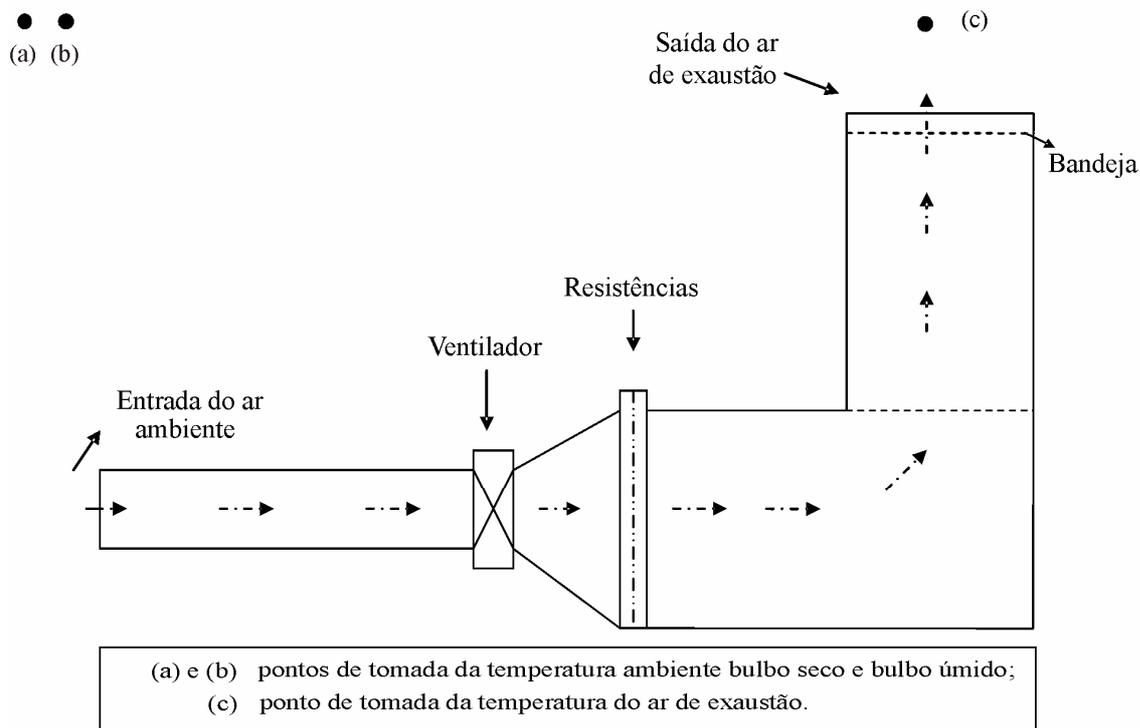
Determinou-se, após o corte, o teor de água do produto em estufa conforme as Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (1985).

Utilizaram-se um secador de lotes de leito fixo, com controle automático da temperatura do ar de secagem, composto por um ventilador de 372,85 W, três resistências elétricas de 400 W cada e bandeja com diâmetro de 0,335 m. Movimentou-se o ar perpendicularmente ao sentido da bandeja. Reduziu-se a umidade do abacaxi, por meio da secagem com ar aquecido e circulação forçada até o teor de água final de, aproximadamente, 20 % b.u.

Utilizaram-se as temperaturas do ar de secagem, as quais variaram de 60, 65 e 70 °C e a velocidade do ar de secagem de 0,5; 0,75 e 1,00 m s<sup>-1</sup> conforme descrito na Tabela 2. Utilizaram-se três secagens para cada tratamento. O delineamento experimental utilizado foi um esquema fatorial 3X3.

**Tabela 2:** Disposição dos tratamentos em relação à temperatura e velocidade do ar de secagem

| Tratamento | Temperatura (°C) | Velocidade (m s <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------------|---------------------------------|
| 1          | 70               | 1,00                            |
| 2          | 70               | 0,75                            |
| 3          | 70               | 0,50                            |
| 4          | 65               | 1,00                            |
| 5          | 65               | 0,75                            |
| 6          | 65               | 0,50                            |
| 7          | 60               | 1,00                            |
| 8          | 60               | 0,75                            |
| 9          | 60               | 0,50                            |



**Figura 2:** Esquema do secador utilizado na secagem de abacaxi.

A velocidade de saída do ar no secador foi monitorada por meio de um termoanemômetro (precisão de  $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 5\% + 1 \text{ d}$ ) e a massa do produto foi medida em uma balança digital, com precisão centesimal, em intervalos de trinta minutos. Mediram-se as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido e do ar de exaustão nos pontos a, b e c por meio de termopares tipo T, utilizando-se um sistema de aquisição de dados, conforme apresentado na Figura 2.

Para avaliar os desvios entre os resultados simulados e os obtidos experimentalmente, utilizou-se o erro relativo médio, o coeficiente de determinação e o coeficiente de variação. O erro relativo médio foi determinado conforme a Equação 20.

$$\bar{e} = \frac{\sum \left[ \frac{Y_j - Y_1}{Y_1} \right]}{n} \quad (20)$$

em que,

$\bar{e}$  = Erro relativo médio;

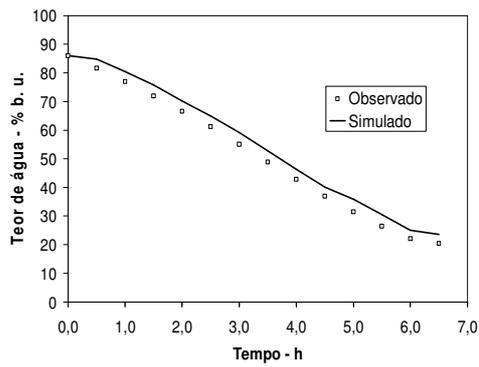
$Y_j$  = Valor obtido experimentalmente;

$Y_1$  = Valor simulado; e

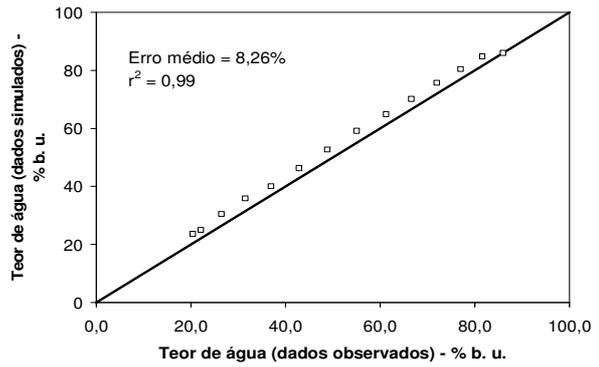
$n$  = Número de dados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de simulação de secagem de abacaxi utilizando-se o modelo implementado, bem como os pontos obtidos experimentalmente e a correspondência entre os mesmos, são apresentadas nas Figuras de 3 a 11. Também está representado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro relativo médio ( $E_m$ ).

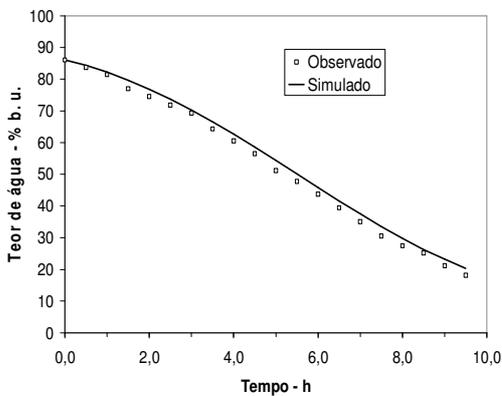


(a)

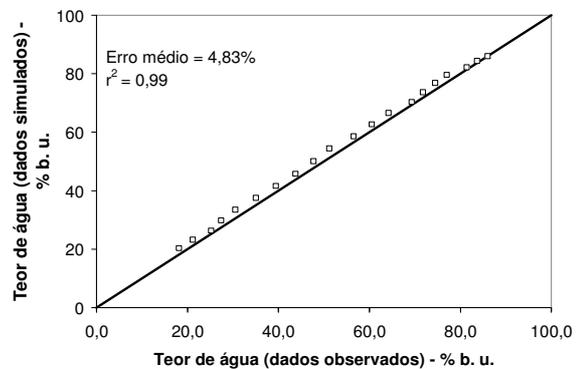


(b)

**Figura 3:** Resultados observados e simulados do teor de água em relação ao tempo no tratamento 1 (a) e a correspondência entre seus valores (b).

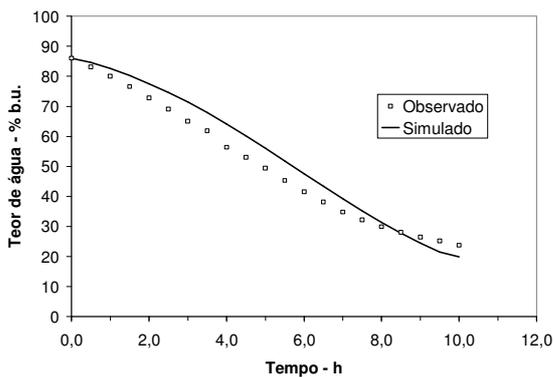


(a)

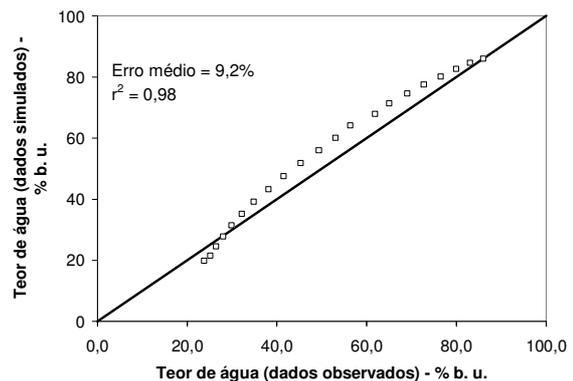


(b)

**Figura 4:** Resultados observados e simulados do teor de água em relação ao tempo no tratamento 2 (a) e a correspondência entre seus valores (b).

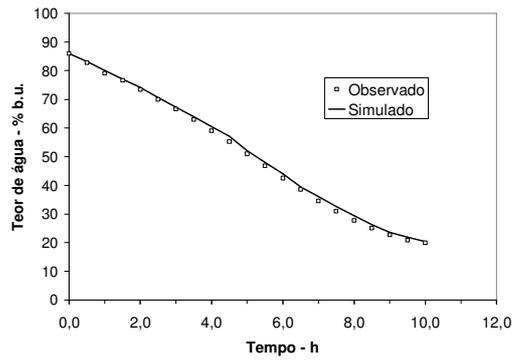


(a)

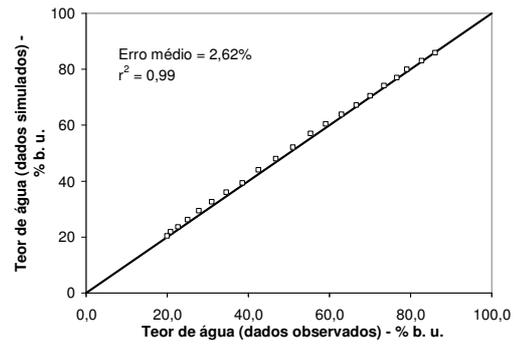


(b)

**Figura 5:** Resultados observados e simulados do teor de água em relação ao tempo no tratamento 3 (a) e a correspondência entre seus valores (b).

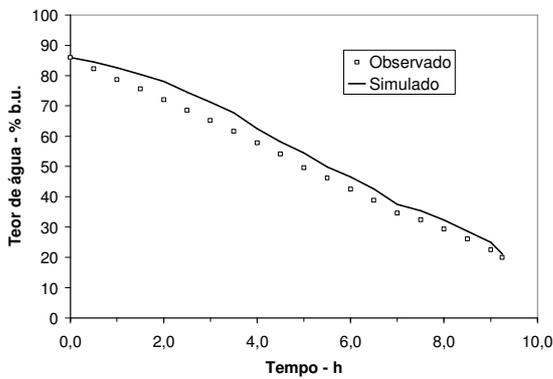


(a)

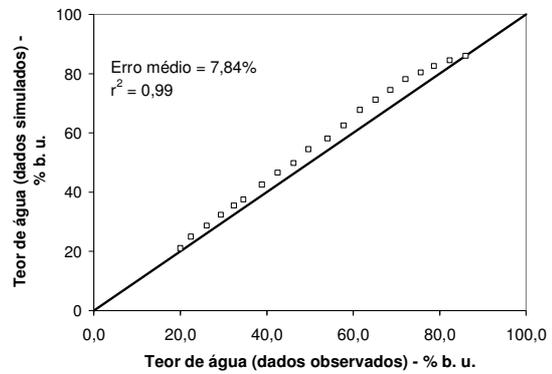


(b)

**Figura 6:** Resultados observados e simulados do teor de água em relação ao tempo no tratamento 4 (a) e a correspondência entre seus valores (b).

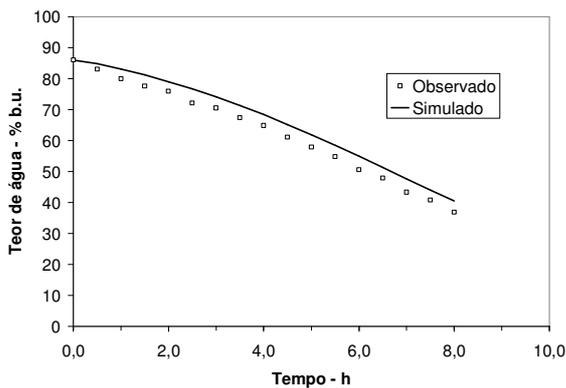


(a)

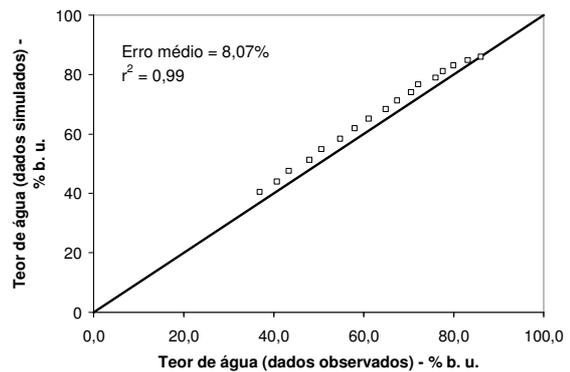


(b)

**Figura 7:** Resultados observados e simulados do teor de água em relação ao tempo no tratamento 5 (a) e a correspondência entre seus valores (b).

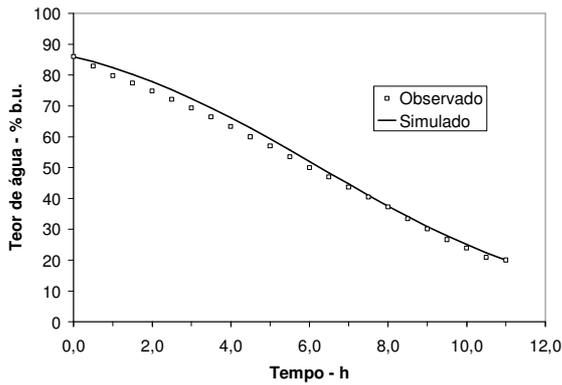


(a)

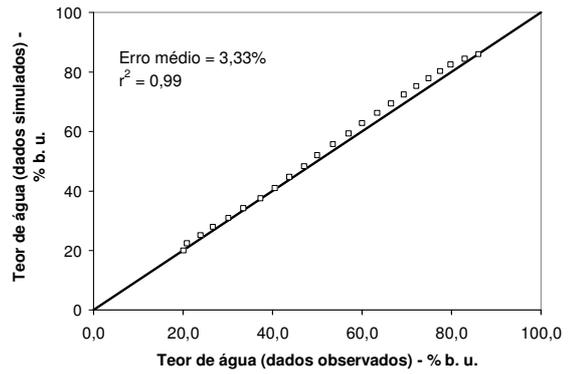


(b)

**Figura 8:** Resultados observados e simulados do teor de água em relação ao tempo no tratamento 6 (a) e a correspondência entre seus valores (b).

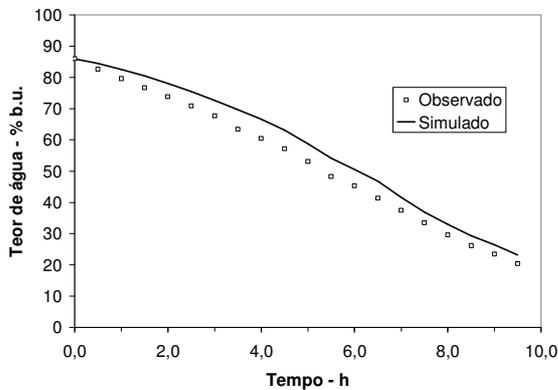


(a)

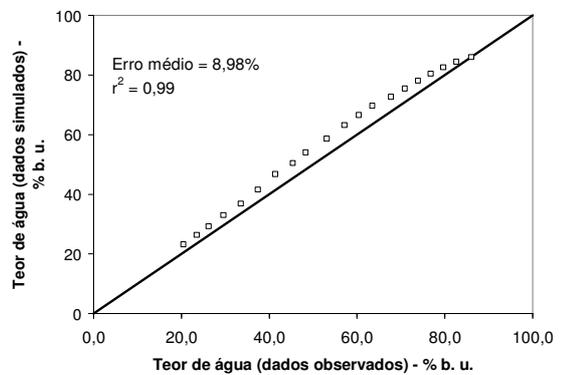


(b)

**Figura 9:** Resultados observados e simulados do teor de água em relação ao tempo no tratamento 7 (a) e a correspondência entre seus valores (b).

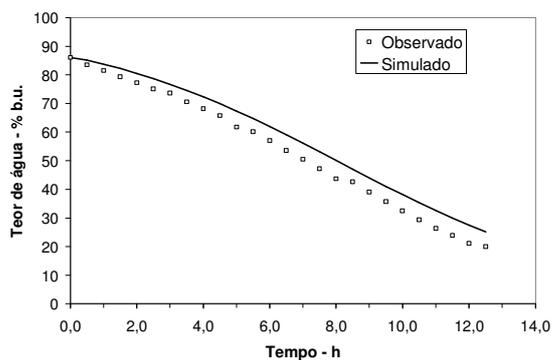


(a)

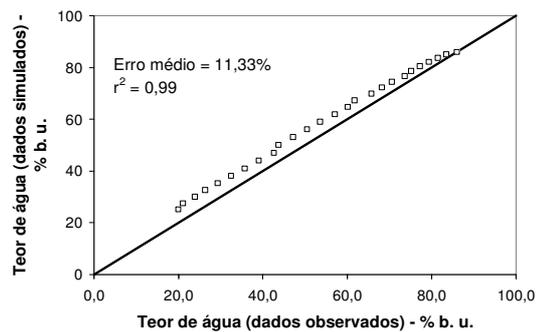


(b)

**Figura 10:** Resultados observados e simulados do teor de água em relação ao tempo no tratamento 8 (a) e a correspondência entre seus valores (b).



(a)



(b)

**Figura 11:** Resultados observados e simulados do teor de água em relação ao tempo no tratamento 9 (a) e a correspondência entre seus valores (b).

Pode-se observar que, em geral, o modelo superestimou a taxa de secagem em quase todos os tratamentos e, somente no tratamento 3, conseguiu-se subestimar a partir de 9h (Figura 5).

De um modo geral pode-se verificar que os resultados simulados foram superiores aos obtidos experimentalmente, com valor do erro relativo médio variando entre 2,62 e 11,33% e os coeficientes de determinação próximos de 0,99. Estes valores indicam que o comportamento das curvas dos dados simulados representa a curva dos dados experimentais, dentro dos limites toleráveis e erros aceitáveis no processo de engenharia, considerando-se as condições em que foi conduzido o experimento.

Estes fatos demonstram que o modelo de simulação desenvolvido é consistente, podendo esse ser usado na simulação da secagem de abacaxi em leito fixo. O erro relativo médio observado de 7,3% é inferior aos 20% que MATA e DANTAS (1998) observaram para o cacau e aos 10,9% que SOUZA et al. (2002) observou para o milho, sendo que os mesmos os consideraram satisfatórios.

O erro relativo médio pode ser verificado pela tendência apresentada pelas curvas dos dados simulados e observados. É possível que sua causa seja devido à redução de volume do produto ao ser submetido à secagem. O modelo de THOMPSON et al. (1968) não considera a redução do volume do produto. O modelo utilizado considerou que o abacaxi possuía a mesma temperatura do ar que as cercavam após os balanços de massa e energia, levando em conta o resfriamento devido à evaporação da água do produto e das temperaturas iniciais do produto e do ar.

A grande redução de volume do abacaxi, ao ser submetido à secagem, pode estar interferindo nos resultados estimados. Possíveis melhorias poderiam ser obtidas caso se utilizasse um modelo que considerasse esse fator. Porém, o uso de tal modelo poderia levar a um aumento do grau de dificuldade para sua solução.

## CONCLUSÃO

O modelo matemático implementado para a secagem de abacaxi em fatias, usando secador de leito fixo, mostrou-se viável, apresentou precisão satisfatória e é válido para simular a secagem de abacaxi.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, L.C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J.B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão-preto sob condição de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.5, n.1, p.5-18, 1980.

ASAE-AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE Standards D271.2**. St. Joseph: ASAE, 1998. p.24-31.

BABALIS, S.J., VELESSIOTIS, V.G. Influence conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, 65:449-458, 2004.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

CONDE, F.M. **Simulação de secagem de cenoura (*Daucus carota* L.) em secador de bandeja**. Viçosa-MG: UFV, 2004. 78p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal de Viçosa, 2004.

FIOREZE, R., MORINI, B. Yam (*Discorea* sp) drying with different cuts and temperatures: experimental and simulated results. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v.20, n.2. maio/ago, 2000.

FORTES, M.; OKOS, M.R. Heat and mass transfer in hygroscopic capillary extruded products. **AIChE Journal**, St. Joseph, v.27, n.2, p.102-113, 1981.

HAWLADER, M.N.A., UDDIN, M.S., HO, J.C., TENG. A.B.W. Drying characteristics of tomatoes. **Journal of Food Engineering**, 14:259-268, 1991.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 3.ed., São Paulo, v.1, 1985. 533p.

MATA, M.E.R.M.C., DANTAS, L.A. Modelo de simulação de secagem de cacau (*Theobroma cacao* L.) em camada fixa. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.23, p.52-60, 1998.

MOSHSENIN, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. London: Gordon and Breach Science Publishers, 1980, 405 p.

NICOLETTI, J.F. **Cinética de secagem e encolhimento de fatias de abacaxi**. São José do Rio Preto, SP: UNESP, 2001. 60p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Universidade Estadual Júlio de Mesquita, 2001.

RODRIGUES, E. **Secagem de abacaxi em secador de leito fixo**. Viçosa, MG:UFV, 2006. 106 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2006.

SILVA, J.S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, Aprenda Fácil, 2000. 502 p.

SOUZA, C.M.A., QUEIROZ, D.M., LACERDA FILHO, A.F. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. **Scientia Agrícola**, v.59, n.4, p.653-660, out./dez., 2002.

THOMPSON, T.L., PEART, R.M., FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying. A new model. **Transaction of the ASAE**, v.11, p.582-586, 1968.

TOGRUL, I.T., PEHLIVAN, D. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. **Journal of Food Engineering**, 65:413,425, 2004.