

# Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto

Osvaldo Resende<sup>1\*</sup>, Renan Vieira Arcanjo<sup>2</sup>, Valdiney Cambuy Siqueira<sup>2</sup> e Silvestre Rodrigues<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rod. Sul Goiana, km 1, 75901-970, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil. <sup>2</sup>Universidade Federal de Rondônia, Rolim de Moura, Rondônia, Brasil. <sup>3</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Rondônia, Rolim de Moura, Rondônia, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: osvresende@yahoo.com.br

**RESUMO.** Objetivou-se com o presente trabalho estimar e avaliar as curvas de secagem do café da espécie *Coffea Canephora* e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais de quatro clones. Foram utilizados frutos de café dos clones: Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró 180, colhidos com os teores de água iniciais de 1,20; 1,32; 1,51 e 1,46 (decimal b.s.), respectivamente. A secagem prosseguiu em terreiro de concreto até que o produto atingisse o teor de água de, aproximadamente, 0,10 (decimal b.s.). Aos dados experimentais foram ajustados dez modelos matemáticos, citados na literatura específica e utilizados para representação do processo de secagem de produtos agrícolas. Pelos resultados obtidos e com base em parâmetros estatísticos, pode-se concluir que o modelo de Page foi adequado para representação da secagem dos quatro clones de café analisados. Além desse, para o clone Cpafró 180, os modelos Verna, Dois Termos e Aproximação da Difusão também se mostraram satisfatórios na descrição do fenômeno. O tempo necessário para a secagem em terreiro de concreto dos clones de café Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró 180, até o teor de água de 0,10 (decimal b.s.), foi de 117,5 h, e o coeficiente de difusão foi de  $4,50 \times 10^{-11}$ ;  $5,17 \times 10^{-11}$ ;  $5,08 \times 10^{-11}$  e  $5,50 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , para os clones analisados, respectivamente.

**Palavras-chave:** café, clones, modelagem matemática, teor de água.

**ABSTRACT. Mathematical modeling for drying coffee (*Coffea canephora* Pierre) berry clones in concrete yard.** The objective of this work was to obtain and evaluate the drying curves for the coffee berry species *Coffea Canephora*, and to fit different mathematical models into the experimental data of four clones. Coffee berries from the following clones were used: Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 and Cpafró 180, harvested at moisture contents of 1.20; 1.32; 1.51 and 1.46 (decimal d.b.), respectively. The drying continued in a concrete yard until the moisture content of 0.10 (decimal d.b.) was achieved. Ten mathematical models cited in literature were fitted to the experimental data in order to represent the drying process. According to the results and based on the statistical parameters, it can be concluded that the Page model represents well the drying of four coffee berry clones; for the clone Cpafró180, the Verna and other models were also satisfactory in describing the phenomenon. The drying time in concrete yard for coffee berry clones Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 and Cpafró 180, up to the moisture content of 0.10 (decimal d.b.) was 117.5 hours and the diffusion coefficient was  $4.50 \times 10^{-11}$ ;  $5.17 \times 10^{-11}$ ;  $5.08 \times 10^{-11}$  and  $5.50 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , for analyzed clones, respectively.

**Key words:** coffee berry, clones, mathematical model, moisture content.

## Introdução

A cafeicultura é uma importante atividade agrícola desenvolvida no Brasil, que é, historicamente, líder mundial da produção de café. O Estado de Rondônia é o sexto produtor de café do país, apresentando, na safra de 2006/2007, a produção de 1.263.000 sacas, que representa 3% da produção nacional, com produtividade média de 7,8 sacas por hectare. Considerando apenas a espécie

de café cultivada em Rondônia (*Coffea Canephora* Pierre), o Estado é o segundo maior produtor, sendo responsável por 13,3% da produção brasileira, superado apenas pelo Espírito Santo, com 72,5%.

A produção de café desenvolvida no Estado de Rondônia se caracteriza pelo baixo nível tecnológico utilizado na condução da lavoura. A cultura do café, em Rondônia, pode ser caracterizada por dois sistemas produtivos principais: cafeicultura

tradicional - ocorre sem adubação e desbrota das plantas, o café é plantado no espaçamento 4 x 1 m em área de pastagem e a secagem do produto realizada em carregadores, dentro da própria lavoura; cafeicultura adubada - o café é plantado no espaçamento 3 x 1,5 m e conduzido com três hastes, realiza-se a adubação de plantio (adubo mineral e matéria orgânica) e em cobertura (adubo mineral e adubação foliar) e a secagem é conduzida em terreiro de concreto.

O café recém-colhido, por ser um produto que apresenta certas peculiaridades, tais como alto teor de água, aproximadamente 60% (b.u.), e desuniformidade em relação à maturação, difere dos demais grãos cultivados em larga escala, necessitando, portanto, de um método de secagem específico.

Assim, a secagem é uma etapa de fundamental importância na fase pós-colheita do café e deve ser iniciada logo após a colheita para reduzir, rapidamente, o alto teor de água da casca, polpa e mucilagem e evitar as fermentações que podem prejudicar a qualidade do café.

A secagem do café pode ser realizada de diferentes formas: em terreiros, mecanicamente, utilizando secadores, ou ainda, de forma mista combinando secagem em terreiros e secadores.

Na secagem em terreiros, ou com ar natural, o produto é retirado da planta e depositado em um pátio previamente preparado, denominado terreiro, e a radiação solar é a energia utilizada para remoção do teor de água. A secagem em terreiros é possível quando da ocorrência da baixa umidade relativa do ar e pouca nebulosidade existente em diversas regiões do Brasil durante o período de colheita. A principal vantagem do método é a economia de energia, porém apresenta o inconveniente de exigir extensas áreas e depender dos fatores climáticos, que, sendo desfavoráveis, retardam o processo e favorecem a ocorrência de fermentações indesejáveis, comprometendo a qualidade do produto (SILVA; BERBERT, 1999).

No Brasil, ainda é predominante a secagem de café em terreiros, os quais podem ser construídos de concreto, asfalto, tijolos, chão batido, leito suspenso e lama asfáltica. O produto é espalhado sobre a superfície e revolvido periodicamente. Quando o café atinge o estágio de meia seca, aproximadamente 30% (b.u.), recomenda-se amontoá-lo e cobri-lo, quando as condições não são adequadas para a secagem.

Na maioria dos casos, a secagem é executada em camadas finas, com espessura em torno de 5 cm. Conforme a uniformidade de maturação dos grãos, a secagem do café, até os níveis comerciais, tem duração que varia de oito a 20 dias, dependendo das

condições climáticas locais. No entanto, em regiões de clima quente, que apresentem elevado índice de radiação solar, o tempo de secagem em terreiros de concreto pode ser ainda menor.

Diversos trabalhos já foram realizados com o objetivo de estudar a secagem do café em diversas condições. Entretanto, a maioria destas investigações é realizada para descrever a secagem de cultivares de café da espécie *Coffea arabica* (CHANDRASEKAR; VISWANATHAN, 1999; ANDRADE et al., 2003; AFONSO JÚNIOR et al., 2004; CORRÊA et al., 2006; LACERDA FILHO et al., 2006; BORÉM et al., 2008).

Gitimu (1995) relata que a secagem do café ao sol tem efeito positivo na qualidade, e que alguns cuidados especiais devem ser tomados de acordo com os estágios da secagem: a) de 44 a 33% (b.u.), para evitar rachaduras no pergaminho, a secagem deve ocorrer de forma lenta; para isso, deve-se cobrir o café durante as horas mais quentes do dia; b) de 32 a 22% (b.u.), a cor final do grão é formada, por isso é recomendado que o café fique exposto à luz solar por um período não menor que dois dias para melhorar a qualidade da cor; a secagem mecânica não deve ser usada nesse estágio; c) de 21 a 12% (b.u.), o café pode ser seco mais rapidamente sem prejuízo na qualidade, inclusive com a utilização de secadores.

Durante a comparação entre diferentes materiais de pavimentação de terreiro para a secagem de café na região da Zona da Mata Mineira, Lacerda Filho et al. (2006) verificaram que o terreiro de terra recoberto com 'esterco verde' e o pavimentado com tijolos não permitiram a boa qualidade do produto; por outro lado, os terreiros pavimentados com asfalto e cimento proporcionaram maior redução no teor de água dos frutos e foram mais eficientes energeticamente no processo de secagem.

De acordo com Andrade et al. (2003), o terreiro de concreto apresentou a maior taxa de redução de água e, conseqüentemente, menor tempo de secagem, comparativamente aos terreiros de chão batido, lama asfáltica e leito suspenso, durante a secagem dos cafés cereja natural, cereja desmucilado e boia.

Além disso, o fenômeno de redução do teor de água de grãos envolve simultaneamente a transferência de calor e massa, que pode alterar de forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem (BROOKER et al., 1992).

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água. Para a simulação, cujo princípio se

fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (BERBERT et al., 1995; GINER; MASCHERONI, 2002).

O processo de secagem de produtos agrícolas, em camada delgada, tem por finalidade a determinação das taxas de secagem do produto utilizando-se para a coleta de dados o registro das perdas de massa ocorridas em uma amostra durante a remoção de água (MONTE et al., 2008).

Assim, as curvas de secagem, em camada delgada, variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Nesse sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas, embora, na maioria das vezes, as relações semi-empíricas e empíricas têm-se mostrado como melhores opções para prever a secagem de grãos e sementes, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992).

Esses modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorra somente no período de taxa decrescente.

As equações semi-empíricas têm como base a lei de resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção, presumindo-se que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de água seja restrita à superfície do produto.

Recentemente, têm sido realizados inúmeros trabalhos com o objetivo de identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem como: feijão (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999; CORRÊA et al., 2007; DOYMAZ, 2005a), arroz em casca (BASUNIA; ABE, 2001), uva (YALDIZ et al., 2001; RAMOS et al., 2004; RAMOS et al., 2005), sementes de ockra (DOYMAZ, 2005b), pimenta (KAYMAK-ERTEKIN, 2002; AKPINAR et al., 2003), pera (LAHSASNI et al., 2004), batata (DOYMAZ, 2004), tomate (DOYMAZ, 2007a), abóbora (DOYMAZ, 2007b), trigo parbolizado (MOHAPATRA; RAO, 2005), milho (DOYMAZ; PALA, 2003) e café em coco (CORRÊA et al., 2006), dentre outros.

Diante da importância do café na economia brasileira e da limitação de informações teóricas a respeito da secagem da espécie *Coffea Canephora* e suas cultivares, objetivou-se com o presente trabalho estimar e avaliar as curvas de secagem do produto e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais durante a secagem de quatro clones da espécie.

## Material e métodos

O experimento foi desenvolvido no Departamento de Agronomia do campus da Universidade Federal de Rondônia, Rolim de Moura, Estado de Rondônia.

Foram utilizados frutos de café (*Coffea canephora* Pierre) dos clones: Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró 180, procedentes de lavoura situada na área experimental de clones da Embrapa em Rolim de Moura, Estado de Rondônia. Estes clones foram desenvolvidos pela Embrapa Rondônia e estão em fase de difusão entre os agricultores do Estado.

O produto foi colhido, manualmente, pelo sistema de derraça no pano, com os teores de água iniciais de 1,20; 1,32; 1,51 e 1,46 (decimal b.s.) para os clones Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró 180, respectivamente.

Posteriormente à colheita, os frutos foram submetidos à secagem em terreiro de concreto, sendo espalhados em camadas de 3 cm de espessura e revolvidos periodicamente ao longo do dia. A secagem prosseguiu até que o produto atingisse o teor de água de aproximadamente 0,10 (decimal b.s.).

Os teores de água do produto ao longo da secagem foram acompanhados diariamente e determinados pelo método da estufa, 105±1 °C, até massa constante, em três repetições.

Para a avaliação da secagem dos clones de café, procedeu-se à determinação da taxa de redução de água do produto de acordo com a expressão descrita por Corrêa et al. (2001):

$$TRA = \frac{Ma_0 - Ma_i}{Ms \cdot (t_i - t_0)} \quad (1)$$

em que:

- TRA = taxa de redução de água (kg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>);
- Ma<sub>0</sub> = massa de água total anterior (kg);
- Ma<sub>i</sub> = massa de água total atual (kg);
- Ms = matéria seca (kg);
- t<sub>0</sub> = tempo total de secagem anterior (h);
- t<sub>i</sub> = tempo total de secagem atual (h).

O teor de água de equilíbrio dos frutos de café foi calculado utilizando-se a seguinte expressão:

$$U_e^* = \left( 2,9636 + 0,053 \cdot T - 10,7837 \cdot UR^{4,5136} \right)^{-1,6503} \quad (2)$$

em que:

$U_e^*$  = teor de água de equilíbrio do produto (decimal b.s.);

T = temperatura do ar de secagem (°C);

UR = umidade relativa do ar de secagem (decimal).

Para a determinação das razões de umidade do café durante a secagem em terreiro de concreto, utilizou-se a seguinte expressão:

$$RU = \frac{U_e^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} \quad (3)$$

em que:

RU = razão de umidade do produto (adimensional);

$U_e^*$  = teor de água do produto (decimal b.s.);

$U_i^*$  = teor de água inicial do produto (decimal b.s.);

Aos valores médios dos dados experimentais da secagem do café foram ajustados dez modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999; AKPINAR et al., 2003; ERTEKIN; YALDIZ, 2004; LAHSASNI et al., 2004; CORRÊA et al., 2007), cujas expressões estão apresentadas na Tabela 1.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem foram obtidos por meio de uma estação climatológica de referência do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), situada a 100 m do local de secagem. A temperatura da massa de café foi monitorada diariamente, por meio de sonda termométrica.

O coeficiente de difusão foi determinado de acordo com a expressão desenvolvida por Brooker et al. (1992), para a forma geométrica esférica:

$$RU = \frac{U_e^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ -\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{9 \cdot r^2} \cdot \left( \frac{3}{r} \right)^2 \right] \quad (4)$$

em que:

D = coeficiente de difusão líquida, (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>);

t = tempo de secagem, (s);

n = número de termos;

r = raio equivalente, (m).

**Tabela 1.** Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas.

Designação do modelo	Modelo	
RU = 1 + AT + BT <sup>2</sup>	Wang e Singh	(5)
RU = a . exp(-k.t) + (1-a) exp (-k <sub>i</sub> .t)	Verna	(6)
RU = exp ((-a-(a <sup>2</sup> + 4 . t . t) <sup>0,5</sup> )/2 . b)	Thompson	(7)
RU = exp (-k . t <sup>n</sup> )	Page	(8)
RU = exp (-k . t)	Newton	(9)
RU = a . exp (-k . t) + c	Logarítmico	(10)
RU = a . exp (-k . t)	Henderson e Pabis	(11)
RU = a . exp (-k . t) + (1 - a) exp (-k . a . t)	Exponencial de Dois Termos	(12)
RU = a . exp (-k <sub>0</sub> . t) + b . exp (-k <sub>1</sub> . t)	Dois Termos	(13)
RU = a . exp (-k . t) + (1 - a) . exp (-k . b . t)	Aproximação da Difusão	(14)

em que:

k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub> : constantes de secagem (s<sup>-1</sup>);

a, b, c, n : coeficientes dos modelos.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi realizada análise de regressão linear e não-linear, pelo método Gauss Newton, utilizando-se o software STATISTICA 5.0®. O grau de ajuste de cada modelo considerou a significância do coeficiente de regressão pelo teste t, adotando o nível de 5% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) e a verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. O erro médio relativo e o erro médio estimado, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (15)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (16)$$

em que:

Y = valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$  = valor estimado pelo modelo ajustado;

N = número de observações experimentais;

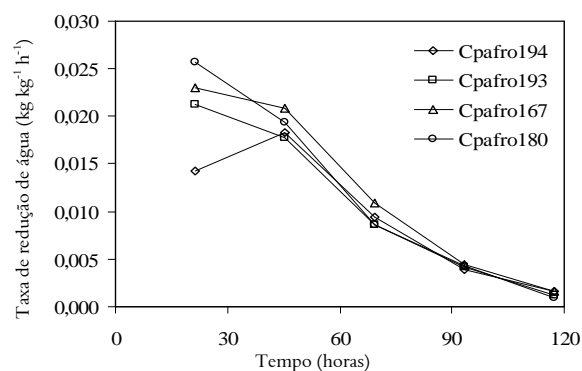
GLR = graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

## Resultados e discussão

A temperatura do ar de secagem influencia na taxa de remoção de água do produto, (OZDEMIR; DEVRES, 1999; BASUNIA; ABE, 2001; YALDIZ et al., 2001; AZZOUZ et al., 2002; KAYMAK-ERTEKIN, 2002; AKPINAR et al., 2003; LAHSASNI et al., 2004; BABALIS; BELESSIOTIS, 2004; MOHAPATRA; RAO, 2005). De acordo com o monitoramento das condições climáticas, os valores

médios da temperatura e da umidade relativa no período de secagem foram de 26,3°C e 63,3%, respectivamente. Já a temperatura da massa de grãos, medida diariamente às 14h, apresentou variação entre 41,1 e 51,1°C para os quatro clones estudados e durante cinco dias de monitoramento.

Na Figura 1, são apresentados os valores médios da taxa de remoção de água dos clones de café Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró 180 para a secagem em terreiros de concreto.



**Figura 1.** Taxa de redução de água ( $\text{kg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) dos clones de café Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró 180 ao longo do tempo (horas), durante a secagem em terreiro de concreto.

Verifica-se, na Figura 1, que as maiores taxas de redução de água, para os quatro clones analisados, ocorreram no início da secagem, sendo o maior valor observado para o clone Cpafró 180 com magnitude de  $0,026 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . No final da secagem, a água se encontra fortemente ligada, necessitando de maior energia para a sua evaporação, assim a secagem do café ocorreu mais lentamente, resultando em menores valores da taxa de redução de água. Para o teor de água de  $0,10 \pm 0,01$  (decimal b.s.), a taxa de remoção de água apresentou magnitude de aproximadamente  $0,001 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  para os quatro clones de café. Verifica-se, ainda, que, ao longo da secagem no terreiro de concreto, os clones de café Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró 180 apresentaram valores das taxas de redução de água semelhantes. Dessa forma, pode-se inferir que estes clones possuem características de secagem similares.

Na Tabela 2, encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os dez modelos de secagem analisados para a secagem dos quatro clones de café da espécie *coffea canephora*. Os modelos Verna, Page, Dois Termos e Aproximação da Difusão apresentaram os menores valores do erro médio estimado para os quatro clones analisados.

**Tabela 2.** Grau de liberdade (GL), coeficientes de determinação ( $R^2$ ), erros médio relativo (P) e estimado (SE) e tendência de distribuição dos resíduos, para os dez modelos analisados, durante a secagem dos clones Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró 180 em terreiro de concreto.

Cpafró 194					
Modelo	GL	$R^2$ (%)	SE (decimal)	P (%)	Distribuição dos resíduos
Wang e Singh	4	99,24	0,039	14,81	Tendenciosa
Verna	3	99,91	0,016	28,02	Aléatoria
Thompson	4	96,77	0,081	104,18	Tendenciosa
Page	4	99,97	0,008	7,89	Aléatoria
Newton	5	96,77	0,073	104,19	Tendenciosa
Logarítmico	3	98,59	0,062	66,67	Tendenciosa
Henderson e Pabis	4	97,12	0,077	96,58	Tendenciosa
Exponencial de Dois Termos	4	96,77	0,081	104,20	Tendenciosa
Dois Termos	2	99,91	0,019	28,02	Aléatoria
Aproximação da Difusão	3	99,91	0,016	28,02	Aléatoria
Cpafró 193					
Wang e Singh	4	99,97	0,020	31,83	Tendenciosa
Verna	3	99,94	0,012	19,90	Aléatoria
Thompson	4	98,82	0,048	63,76	Tendenciosa
Page	4	99,99	0,003	2,74	Aléatoria
Newton	5	98,82	0,043	63,78	Tendenciosa
Logarítmico	3	99,56	0,034	40,28	Tendenciosa
Henderson e Pabis	4	98,92	0,046	60,21	Tendenciosa
Exponencial de Dois Termos	4	98,82	0,048	63,20	Tendenciosa
Dois Termos	2	99,94	0,015	19,90	Aléatoria
Aproximação da Difusão	3	99,94	0,012	19,90	Aléatoria
Cpafró 167					
Wang e Singh	4	99,91	0,019	21,15	Tendenciosa
Verna	3	99,93	0,013	14,72	Aléatoria
Thompson	4	98,49	0,054	56,78	Tendenciosa
Page	4	99,99	0,002	4,43	Aléatoria
Newton	5	99,48	0,048	56,76	Tendenciosa
Logarítmico	3	99,37	0,040	38,09	Tendenciosa
Henderson e Pabis	4	98,63	0,052	53,19	Tendenciosa
Exponencial de Dois Termos	4	98,49	0,054	57,42	Tendenciosa
Dois Termos	2	99,93	0,016	14,72	Aléatoria
Aproximação da Difusão	3	99,93	0,013	13,67	Aléatoria
Cpafró 180					
Wang e Singh	4	99,6	0,027	40,06	Tendenciosa
Verna	3	99,98	0,007	8,17	Aléatoria
Thompson	4	99,26	0,038	39,08	Tendenciosa
Page	4	99,99	0,005	7,22	Aléatoria
Newton	5	99,26	0,034	39,06	Tendenciosa
Logarítmico	3	99,66	0,029	28,91	Tendenciosa
Henderson e Pabis	4	99,31	0,036	36,91	Tendenciosa
Exponencial de Dois Termos	4	99,25	0,038	39,14	Tendenciosa
Dois Termos	2	99,98	0,009	8,17	Aléatoria
Aproximação da Difusão	3	99,98	0,007	7,84	Aléatoria

Para os clones Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167, o modelo de Page foi o único a obter magnitude do erro médio relativo inferior a 10%, indicando, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), ser adequado para a descrição do fenômeno; para o clone Cpafró 180, os modelos Verna, Page, Dois Termos e Aproximação da Difusão também obtiveram valores do erro médio relativo menores que 10%.

Verifica-se, ainda na Tabela 2, que os modelos Verna, Page, Dois Termos e Aproximação da Difusão

obtiveram, para a modelagem da secagem dos quatro clones, distribuição aleatória dos resíduos, resultando, assim, em ajustes satisfatórios aos dados experimentais da secagem do café com ar natural em terreiro de concreto, e em condições experimentadas.

De acordo com os parâmetros estatísticos avaliados, o modelo de Page foi adequado para representação da secagem dos quatro clones de café; além desse, para o clone Cpafo 180, os modelos Verna, Dois Termos e Aproximação da Difusão também se apresentaram satisfatórios na descrição do fenômeno. Diversos pesquisadores observaram que o tradicional modelo de Page foi recomendado e aplicado para prever o fenômeno de secagem de vários produtos agrícolas (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999; CORRÊA et al., 2007). Para Corrêa et al. (2006), os modelos de Page e Verna foram os que melhor representaram o fenômeno de secagem dos frutos de café da cultivar Mundo Novo da espécie *Coffea arabica*.

Na Tabela 3, estão os coeficientes do modelo de Page ajustados para os quatro clones analisados e os coeficientes dos modelos Verna, Dois Termos e Aproximação da Difusão para o clone Cpafo 180, durante a secagem em terreiro de concreto.

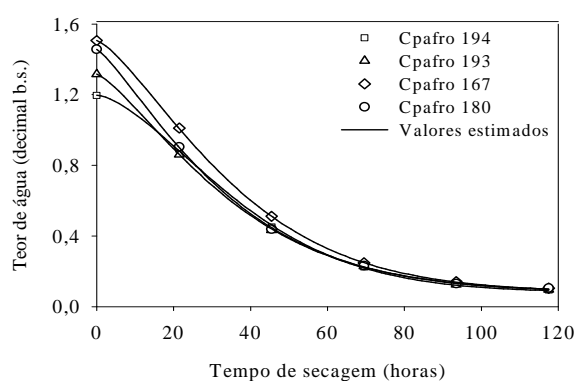
**Tabela 3.** Coeficientes ajustados para os modelos de Page Verna, Dois Termos e Aproximação da Difusão, durante a secagem em terreiro de concreto, dos clones Cpafo 194, Cpafo 193, Cpafo 167 e Cpafo 180.

Modelos	Coeficientes	Clones			
		Cpafo 194	Cpafo 193	Cpafo 167	Cpafo 180
Page	k	$7,02 \times 10^{-9}$	$1,62 \times 10^{-7}$	$8,86 \times 10^{-8}$	$3,78 \times 10^{-7}$
	n	1,579	1,321	1,377	1,265
Verna	a	-	-	-	-0,292
	k	-	-	-	0,100
	$k_1$	-	-	-	$9,92 \times 10^{-6}$
Dois Termos	a	-	-	-	-0,292
	b	-	-	-	0,010
	$k_0$	-	-	-	1,292
	$k_1$	-	-	-	$9,92 \times 10^{-6}$
Aproximação da Difusão	a	-	-	-	-0,296
	$k_0$	-	-	-	0,014
	b	-	-	-	$6,94 \times 10^{-4}$

Na Figura 2, estão ilustrados os teores de água observados e estimados, pelo modelo de Page, para os clones Cpafo 194, Cpafo 193, Cpafo 167 e Cpafo 180, durante a secagem do café. Nota-se, por meio da correspondência entre os valores experimentais e estimados, que o modelo de Page descreve adequadamente o fenômeno de secagem dos clones de café estudados.

Verifica-se, na Figura 2, que os clones de café apresentaram teores de água iniciais diferentes, com magnitudes de 1,20; 1,32; 1,51 e 1,46 (decimal b.s.) para os clones Cpafo 194, Cpafo 193, Cpafo 167 e Cpafo 180, respectivamente. Mesmo com essa

heterogeneidade inicial entre os clones, o tempo necessário para que o produto atingisse o teor de água de, aproximadamente, 0,10 (decimal b.s.) foi de 117,5 horas para os quatro clones analisados. Pode-se inferir que esse fato, possivelmente, deve-se ao elevado teor de água que o café apresentava no início da secagem, o qual, conseqüentemente, provocou taxas de secagem superiores no início do processo. Ao final da secagem, as taxas de remoção de água diminuíram e as discrepâncias entre os valores dos teores de água dos clones também reduziram.



**Figura 2.** Valores experimentais dos teores de água e estimados pelo modelo de Page (decimal b.s.), ao longo do tempo de secagem (horas), para os clones de café Cpafo 194, Cpafo 193, Cpafo 167 e Cpafo 180.

O coeficiente de difusão para os frutos de café, durante a secagem em terreiro de concreto, apresentou magnitudes de  $4,50 \times 10^{-11}$ ;  $5,17 \times 10^{-11}$ ;  $5,08 \times 10^{-11}$  e  $5,50 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para os clones Cpafo 194, Cpafo 193, Cpafo 167 e Cpafo 180, respectivamente. Os valores do coeficiente de difusão calculados para os clones de café estão coerentes com os relatados na literatura para secagem de produtos agrícolas que, de acordo com Madamba et al. (1996), apresentam-se na ordem de  $10^{-11}$  a  $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Corrêa et al. (2006) verificaram que o coeficiente de difusão para os frutos de café da espécie *Coffea arabica* foi de  $2,91 \times 10^{-10}$ ;  $3,57 \times 10^{-10}$  e  $4,96 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , para as temperaturas de 40, 50 e 60°C, respectivamente.

## Conclusão

Analisando os resultados, conclui-se que, com base em parâmetros estatísticos, o modelo de Page foi adequado para representação da secagem dos quatro clones de café analisados; além dele, para o clone Cpafo 180, os modelos Verna, Dois Termos e Aproximação da Difusão também se apresentaram satisfatórios na descrição do fenômeno. O tempo necessário para a secagem em terreiro de concreto dos

clones de café, espécie *Coffea canephora*, Cpafro 194, Cpafro 193, Cpafro 167 e Cpafro 180, até o teor de água de 0,10 (decimal b.s.), foi de 117,5 horas, e o coeficiente de difusão foi de  $4,50 \times 10^{-11}$ ;  $5,17 \times 10^{-11}$ ;  $5,08 \times 10^{-11}$  e  $5,50 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, para os clones analisados.

## Referências

- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.
- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; VILARINHO, M. C.; FRANÇA, A. S. Dinâmica da contração volumétrica do fruto de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, n. 8, p. 29-35, 2004. (Especial café).
- AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v. 59, n. 1, p. 99-104, 2003.
- ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M.; HARDOIM, P. R. Cinética de secagem do café cereja, bóia e cereja desmucilado, em quatro diferentes tipos de terreiros. **Revista Brasileira de Armazenamento**, n. 7, p. 37-43, 2003. (Especial Café).
- AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 4, p. 323-330, 2002.
- BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 3, p. 449-458, 2004.
- BASUNIA, M. A.; ABE, T. Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice. **Journal of Stored Products Research**, v. 37, n. 3, p. 205-219, 2001.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 60, n. 3, p. 167-173, 1995.
- BORÉM, F. M.; MARQUES, E. R.; ALVES, E. Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 1, p. 62-66, 2008.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992.
- CHANDRASEKAR, S. V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 73, n. 3, p. 227-234, 1999.
- CORRÊA, P. C.; MACHADO, P. F.; ANDRADE, E. T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 1, p. 134-142, 2001.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2006.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- DOYMAZ, I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 359-364, 2004.
- DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 2, p. 161-165, 2005a.
- DOYMAZ, I. Drying characteristics and kinetics of okra. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 3, p. 275-279, 2005b.
- DOYMAZ, I. Air-drying characteristics of tomatoes. **Journal of Food Engineering**, London, v. 78, n. 4, p. 1291-1297, 2007a.
- DOYMAZ, I. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 243-249, 2007b.
- DOYMAZ, I.; PALA, M. The thin-layer drying characteristics of corn. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 2, p. 125-130, 2003.
- ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v. 63, n. 3, p. 349-359, 2004.
- GINER, S. A.; MASCHERONI, R. H. Diffusive drying kinetics in wheat, Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. **Biosystems Engineering**, v. 81, n. 1, p. 85-97, 2002.
- GITIMU, C. W. Better coffee farming: coffee processing. **Kenya Coffee**, v. 60, n. 703, p. 1997-1998, 1995.
- KAYMAK-ERTEKIN, F. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 1, p. 168-175, 2002.
- LACERDA FILHO, A. F.; SILVA, J. S.; SEDIYAMA, G. C. Comparação entre materiais de pavimentação de terreiro para a secagem de café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, n. 9, p. 83-93, 2006. (Especial Café).
- LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J. T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 2, p. 173-179, 2004.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- MONTE, J. E. C.; MARTINS, J. H.; LOPES, D. C.; MONTEIRO, P. M. B.; PINTO, P. R. Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 3, p. 307-312, 2008.
- OZDEMIR, M.; DEVRES, Y. O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 42, n. 4, p. 225-233, 1999.

RAMOS, I. N.; SILVA, C. L. M.; SERENO A. M.; AGUILERA, J. M. Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue. **Journal of Food Engineering**, v. 62, n. 2, p. 159-164, 2004.

RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. **Journal of Food Engineering**, v. 67, n. 1-2, p. 195-203, 2005.

SILVA, J. S.; BERBERT, P. A. **Colheita, secagem e armazenamento**. Viçosa: Aprenda Fácil, 1999.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN, H. I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, v. 26, n. 5, p. 457-465, 2001.

*Received on December 15, 2007.*

*Accepted on March 23, 2008.*

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.