

MODELAGEM MATEMÁTICA DE SECAGEM DE BANANA EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO

L. B. de CARVALHO^{*1}, J. R. J. JUNQUEIRA¹, A. M. P. BRAGA², M. HOCHHEI², M. A. SILVA² e J. L. G. CORRÊA¹

¹ Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos

² Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química

*E-mail para contato: lucasbcarv@gmail.com

RESUMO – A banana (*Musa ssp.*) apresenta elevado potencial de produção e consumo no mundo, devido ao seu valor nutricional e por ser bem aceita pelo consumidor. Entretanto, devido à sua alta perecibilidade, é necessário o desenvolvimento de técnicas de conservação, como a secagem, aumentando a estabilidade e distribuição desse fruto e, desenvolvendo produtos diferenciados. A modelagem matemática durante a secagem fornece informações sobre o processo em que é aplicada. O objetivo desse trabalho foi avaliar o ajuste das três equações empíricas (Henderson & Pabis, Midilli-Kuçuk e Page) aos dados experimentais da secagem para diferentes estádios de maturação de banana (verde, madura e muito madura). Obtiveram-se bons ajustes para todas as equações, sendo a de Midilli-Kuçuk o melhor para representação da cinética de secagem da banana verde. A equação de Page foi a melhor para dados de banana madura e muito madura, com elevados valores de R^2 e baixos valores de EQM e χ^2 .

1. INTRODUÇÃO

A banana (*Musa ssp.*) é um fruto popular em grande parte do mundo, sendo muito consumida no Brasil. A produção mundial de bananas no ano de 2014 atingiu 114 milhões de toneladas, o que torna a banana uma das frutas com maior potencial de produção global (FAO, 2017). A produção nacional representou 6% deste total. Além disto, se destaca por possuir bom valor nutricional, sendo fonte de carboidratos e sais minerais como potássio, fósforo, magnésio, cálcio, cloro, enxofre e vitaminas A, B₁, B₂, C e B₃ (niacina), todas elas de grande importância para o metabolismo humano (Padovani, 1989). Entretanto, a banana apresenta um processo acelerado de deterioração, devido seu alto teor de umidade, o que torna a comercialização do fruto *in natura* bastante difícil após o amadurecimento (Cabrera-Padilla et al., 2014). Diante desse contexto, a utilização da secagem se apresenta como um processo interessante do ponto de vista econômico e comercial.

A secagem é uma operação unitária que envolve as transferências de calor e massa, utilizada comumente com intuito de estender a vida útil de matérias primas e produtos alimentícios. A diminuição do teor de umidade e atividade de água do material está diretamente relacionada à queda da atividade microbológica e de reações químicas, bioquímicas e físicas que podem ocorrer durante o armazenamento (Resende et al., 2008). No processo de secagem, obtém-se uma relação entre o teor de umidade da amostra e o tempo.

Matematicamente é possível a modelagem desta relação, permitindo-se avaliar o comportamento da cinética de secagem de um material em determinadas condições.

Diante disso, objetivou-se, nesse trabalho, avaliar a cinética de secagem da banana em seus diferentes estádios de maturação, ajustando os modelos matemáticos propostos por Henderson e Pabis, Midilli-Kuçuk e Page aos dados obtidos experimentalmente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As bananas (*Musa acuminata* var. Nanica) foram adquiridas em um mercado local (Campinas, Estado de São Paulo). Para minimizar a influência da variabilidade dos frutos, uma penca de bananas foi adquirida na fase verde. Os experimentos foram feitos sequencialmente à medida que as bananas progrediam de verdes para maduras e posteriormente, para muito maduras. As bananas foram classificadas de acordo com a cor da casca (Corrêa et al., 2012). Sólidos solúveis foram obtidos com auxílio de um refratômetro. Para determinar os sólidos solúveis, colocou-se uma amostra de banana em um mixer com água em uma proporção de 1:3. O suco obtido teve seus sólidos solúveis medidos no refratômetro e o resultado final foi calculado considerando a diluição. O teor de umidade, foi obtido em estufa à vácuo a 70°C (AOAC, 2002). Os dados de caracterização das bananas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização de bananas *in natura* em três estádios de maturação

Maturação	Cor da casca**	Parâmetros de cor da polpa			Teor de umidade [kg água/kg sólido]	SS [kg sólido/kg fruto]
		L*	a*	b*		
Verde	1	63.69±6.43	2.81±1.16	20.10±2.03	2.38±0.03	7.50±0.01
Madura	4	65.09±1.26	3.49±1.22	25.63±4.04	2.50±0.00	19.36±0.02
Muito madura	8	70.32±0.43	-4.61±0.21	25.37±0.08	2.99±0.00	25.34±0.01

** De acordo com Gous et al. (1987).

Os frutos foram lavados em água corrente, descascados e cortados transversalmente em fatias ($2,00 \times 10^2$ m de diâmetro por $0,50 \times 10^2$ m de espessura) com um cortador circular de aço inoxidável e uma faca de aço inoxidável. Utilizou-se um paquímetro digital MIP/E-101 (Mitutoyo Sul Americana Ltda, São Paulo, Brasil) com precisão de 0,02 mm para medir o diâmetro e a espessura das fatias antes e após cada experimento de secagem (Corrêa et al., 2012).

O secador de túnel de policarbonato utilizado no experimento apresentava 1,70 m de comprimento com uma área de secção transversal de $0,07 \text{ m}^2$. O ar entrava no túnel através de um soprador e era aquecido por resistências elétricas. Equalizadores foram usados para uniformizar o fluxo de ar. As amostras foram mantidas em suportes especialmente concebidos que permitiram o contato das amostras de frutos com o ar aquecido apenas na superfície superior. A massa das amostras foi medida por uma balança eletrônica (600 g /0,001 g). Um

controlador lógico programável e um sistema de aquisição de dados controlaram a massa da amostra e a temperatura do ar ao longo do experimento. As condições do ar nos experimentos foram 60°C e 0,84 m s⁻¹, com base em Braga et al. (2010). A umidade relativa do ar aquecido foi de 9±1% (Corrêa et al., 2012).

Com base nos dados experimentais, foram obtidos os teores adimensionais de umidade (MR), conforme a equação 1:

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \approx \frac{X_t}{X_0} \quad (1)$$

Onde X_t é o teor de umidade no tempo (t), X_0 o teor de umidade inicial e X_{eq} o teor de umidade de equilíbrio [kg H₂O kg⁻¹ b.s.]. Nas condições experimentais, o valor de X_{eq} é relativamente pequeno em comparação a X_0 . Com base nisto, seu valor foi considerado zero neste estudo.

Para a avaliação da secagem em diferentes estádios de maturação da banana, foram utilizadas três equações empíricas. Essas equações são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Equações empíricas de cinética de secagem.

Modelo	Equação	Referência
Henderson & Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	Henderson & Pabis (1961)
Midilli – Kuçuk	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$	Midilli – Kuçuk (2002)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page (1949)

As análises estatísticas dos dados experimentais foram realizadas utilizando o software Statistica (Statistica 8.0, Statsoft Inc., Tulsa, OK). O erro quadrático médio (EQM) e qui-quadrado reduzido (χ^2), Equações 5 e 6, respectivamente, foram utilizados como critérios para apontar o melhor ajuste aos dados experimentais, bem como o coeficiente de determinação (R^2).

$$EQM = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{N - n'} \quad (6)$$

Onde MR_{exp} e MR_{pred} representam os teores de umidade adimensional experimentais e preditos, respectivamente; N é o número de observações e n' é o número de constantes das equações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados experimentais, buscou-se a melhor representação da cinética de secagem utilizando os modelos matemáticos. Na tabela 3 são apresentados os parâmetros de cada modelo proposto e os critérios estatísticos usados para avaliar o melhor ajuste. Quanto maior o valor de R^2 e menores valores de EQM e χ^2 , melhor o ajuste dos dados experimentais às equações empíricas (Junqueira et al., 2016).

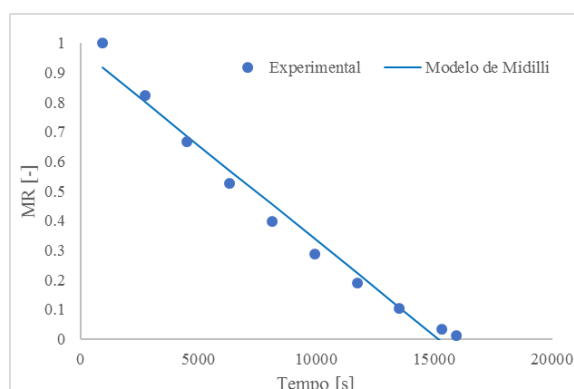
Tabela 3 – Parâmetros dos modelos matemáticos e critérios de comparação.

Modelo	Estádios de maturação	R^2	χ^2	EQM	k	N	a	b
Henderson e Pabis	V	0.984	0.0569	0.0569	0.0002	-	1.2191	-
	M	0.989	0.0025	0.0456	0.0001	-	1.0547	-
	MM	0.994	0.0012	0.0324	0.0001	-	1.0464	-
Midilli-Kuçük	V	0.989	0.0037	0.0468	-1028.61	1182.79	-1057.96	0.0000
	M	0.988	0.0034	0.0464	3.3158	0.6471	0.1076	0.6471
	MM	0.975	0.0060	0.0654	3.3266	0.6883	0.0883	0.0000
Page	V	0.981	0.0048	0.0623	0.0000	1.1772	-	-
	M	0.992	0.0020	0.0380	0.0000	1.0952	-	-
	MM	0.995	0.0009	0.0281	0.0001	1.0633	-	-

Onde: a, b, n e k representam as constantes empíricas e coeficientes das equações de secagem. V significa verde, M, madura e MM, muito madura

De acordo com a Tabela 3, podemos observar que o modelo que obteve o melhor ajuste para a banana verde foi o proposto por Midilli-Kuçük, com R^2 , χ^2 e EQM iguais a 0,989, 0,0037 e 0,0468 respectivamente, podendo seu comportamento ser visualizado na Figura 1. Esta equação empírica também apresentou bons ajustes aos dados experimentais durante a secagem por microondas de fatias de maçã (Zarein et al., 2015).

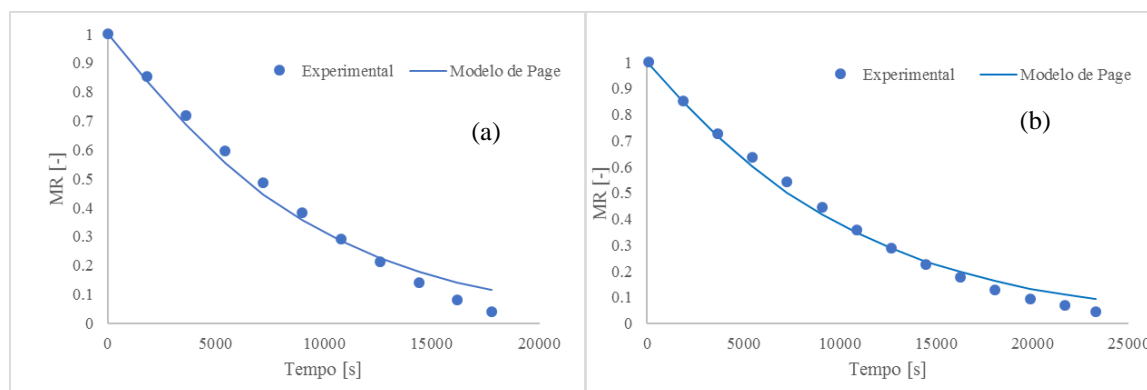
Figura 1 – MR em função do tempo para Banana verde



No entanto, para banana madura e banana muito madura, o modelo com melhor ajuste foi o proposto por Page, com R^2 , χ^2 e EQM iguais a 0,992, 0,0020 e 0.0380 respectivamente para banana madura e R^2 , χ^2 e EQM iguais a 0,995, 0,0009 e 0.0281 respectivamente para

banana muito madura. As curvas de secagem com dados experimentais e modelados podem ser visualizadas nas Figuras 2a e 2b.

Figura 2: MR em função do tempo para Banana madura (a) e muito madura (b).



Doymaz (2012) observou que as equações que melhor se ajustaram a cinética de secagem de fatias de caqui foram as propostas por Page e Midilli-Kuçuk nas condições avaliadas.

4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que todos os modelos tiveram bons ajustes, sendo que a banana verde o melhor foi o proposto por Midilli-Kuçuk e para banana madura e muito madura foi o proposto por Page, com altos valores de R^2 e baixos valores de EQM e χ^2 .

5. REFERÊNCIAS

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*, 18th Ed; AOAC International: Washington, DC, 2002.
- AUORE, G.; PARFAIT, B.; FAHRASMANE, L. Bananas, raw materials for making processed food products. *Trends Food Sci. Tech.*, v. 20, p. 78–91, 2009.
- CABRERA-PADILLA, R. Y.; OLADEINDE, T. O.; FINZER, J. R. D.; LIMAVERDE, J. R. Drying of banana paste in rotatory dryer with inert bed. *Braz. J. Food Technol.*, v. 17, n. 1, p. 41-50, 2014.
- CORRÊA, J. L. G.; BRAGA, A. M. P.; HOCHHEIM, M.; SILVA, A. M. The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe and overripe bananas. *Dry. Tech.*, v. 30, p. 817-826, 2012.

- DOYMAZ, I. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices. *Energy Conver. Manage*, v. 56, p. 199-205, 2012.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO.
FAOSTAT Statistic Database. Disponível em:
<<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 29 mar. 2017.
- GOUS, F.; VAN WYK, P.J.; MCGILL, E.J. The use of commercial enzymes in the processing of bananas. *LWT-Food Sci. Tech.*, v. 20, p. 229–232, 1987.
- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *J. of Agri. Eng. Research*, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.
- JUNQUEIRA, J. R. J.; MENDONÇA, K. S.; CORRÊA, J. L. J; Microwave drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.)) slices: Influence of the osmotic pretreatment. *Def. Diff. Forum*, v. 367, p. 167-174, 2016.
- LII, C.Y.; CHANG, S.M.; YOUNG, Y.L. Investigation of the chemical and physical properties of banana starches. *J. Food Sci.*, v. 47, p. 1493–1497, 1982.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z.A. A new model for single-layer drying. *Dry. Tech.*, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002
- PADOVANI, M. I. *Banana um Mercado Crescente Para Este Alimento Milenar*. 2. ed. São Paulo: ICONE, p. 104, 1989.
- PAGE, C. Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers. M.S. Thesis, Purdue University, 1949.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). *R. Bras. Prod. Agro.*, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.
- ZAREIN, M.; SAMADI, S. H.; GHOBADIAN, B. Investigation of microwavedryer effect on energy efficiency during drying of apples slices. *J. Saudi Soc. Agri. Sci*, v.14, p. 41-47, 2015.