

APLICAÇÃO DOS MODELOS DE FICK E PAGE NA SECAGEM DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia ficus indica*) EM ESTUFA

Yvson Costa e Silva ¹, Francisco Diniz da Silva ², Adriano Sant'Ana Silva ³, Ezenildo Emanuel de Lima ⁴, Jorge Alves de Souza ⁵

¹Aluno de Mestrado em Engenharia Agrícola – UFCG, Avenida Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58.109-970 - Campina Grande – PB – Brasil, yvson77@yahoo.es

²Aluno de Mestrado em Engenharia Agrícola – UFCG, PB, fdinizcg@yahoo.com.br

³Aluno de Mestrado em Engenharia Agrícola – UFCG, PB, yvson77@yahoo.es

⁴Aluno de Mestrado em Engenharia Agrícola – UFCG, PB, fdinizcg@yahoo.com.br

⁵Departamento de Engenharia Agrícola, UFCG, PB, jorgeal@bol.com.br

Palavras-chave: Palma forrageira, modelo de Fick, modelo de Page, secagem, difusividade efetiva
Área do Conhecimento: Ciências Agrárias

Resumo- Foi estudada a aplicação dos modelos de Fick e Page na cinética de secagem de palma forrageira (*Opuntia ficus indica*) em estufa. Foram cortadas amostras medindo aproximadamente 6,0 x 6,0 cm, e posteriormente cortadas ao meio, perpendicularmente à sua altura, a fim de deixar exposto o interior da folha. Realizaram-se ensaios variando a temperatura de secagem de 40°C a 70°C, e posteriormente, a aplicação dos modelos. Através dos dados obtidos, pôde-se concluir que em ambos os modelos estudados, o melhor ajuste ocorreu na temperatura mais baixa, o modelo de Page, para as temperaturas de 40 e 50 °C, ajustou as curvas com coeficiente de correlação acima de 0,99 e que nas temperaturas de 60 e 70 °C, não ocorreu convergência na modelagem dos dados experimentais.

As palmas forrageiras sem espinhos não são nativas do Brasil [1], pertencendo à: divisão *embryophyta*; angiospermea, classe *dicotyledoneae*, ordem *opuntiales*, família *cactaceae*. Nesta família existem 178 gêneros, com cerca de 2.000 espécies conhecidas. No Nordeste brasileiro são encontrados três tipos distintos de palma: gigante (graúda, grande, azeda ou santa), da espécie *Opuntia ficus indica*, planta de porte bem desenvolvido e caule pouco ramificado; redonda, da espécie *Opuntia sp*, planta de porte médio e caule bastante ramificado na lateral; miúda (pequena, doce ou língua-de-vaca), da espécie *Napolea cochenillifera*, planta de porte baixo e caule bastante ramificado, com brotações circulares que emergem do eixo central. A temperatura ideal para o desenvolvimento da palma forrageira varia entre 22°C-23°C, com umidade relativa do ar entre 55-70% e precipitações médias anuais em torno de 400-800mm [2].

A verdura de palma forrageira é tradicionalmente consumida no México, e nos Estados Unidos e outros países, como especialidade. Constitui-se dos cladódios tenros e jovens das cactáceas do gênero *Opuntia*. Nas fases iniciais de crescimento há vestígios de folhas verdadeiras associadas a espinhos, mas as folhas geralmente começam a cair na época em que os cladódios chegam à maturação comercial [3].

Os cladódios de palma forrageira (verdura) de boa qualidade são finos, de aparência fresca, túrgidos e tem uma cor verde brilhante. Depois de cortados da planta e picados na mesa, eles podem ser comidos como hortaliça fresca ou cozida, cujo sabor lembra o de feijão verde.

Um dos mais antigos métodos de conservação de alimentos conhecidos pelo homem é a secagem, onde ocorre simultaneamente a transferência de calor e massa, garantindo o melhor aproveitamento do alimento seco, aumentando o tempo de armazenamento, deixando-os assim, favoráveis ao combate direto de microorganismos e indiretamente de pragas.

A secagem é definida como sendo a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido.

Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor d'água, formado a partir da superfície do material a ser seco. Os métodos de cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferente dependendo do período de secagem considerado. O período de taxa decrescente de secagem é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios. Neste período, a teoria difusional que se apóia exclusivamente sobre a lei de Fick é muito utilizado [4].

O conhecimento da cinética de secagem é fundamental para a modelagem deste processo de conservação, a qual pode ser interpretada pelos vários modelos teóricos baseados na Segunda lei de Fick ou na teoria da capilaridade. [5]

Para o processo unidirecional, considerando uma placa infinita e difusividade efetiva constante, temos a solução analítica da segunda lei de Fick, conforme a equação abaixo:

$$Y = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot \frac{t}{4L^2}\right]$$

Onde:

D_{ef} = Difusividade efetiva, m^2/min ;

Y = conteúdo adimensional de água;

X = conteúdo médio de água, kg_{H_2O}/kg_{ms} ;

X_e = conteúdo de água de equilíbrio, kg_{H_2O}/kg_{ms} ;

X_0 = conteúdo de água inicial, kg_{H_2O}/kg_{ms} ;

i = número de termos da série;

t = tempo, minutos;

L = semi-espessura da amostra, m.

O parâmetro $\frac{8}{\pi^2}$, relacionado com a geometria da amostra, foi substituído por um parâmetro A , a fim de aumentar a precisão do modelo.

Para expressar o comportamento das curvas de secagem em camada fina de produtos agrícolas, Page [4], propôs um modelo com base na equação de Fick, tomando-se, apenas o primeiro termo da série, Desta forma o modelo de Page será:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k \cdot t^N)$$

em que:

k = constante de secagem;

t = coeficiente de correção de ordem potencial N ;

X = conteúdo de água, decimal base seca;

X_e = conteúdo de água de equilíbrio, decimal em base seca;

X_0 = conteúdo de água inicial, decimal em base seca;

$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$ = razão de umidade, adimensional.

Neste trabalho, foi estudada a cinética de secagem de palma forrageira, comparando-se os modelos de Fick e Page para as temperaturas de 40 e 50 °C, mediante experimentos realizados em camada fina.

Materiais e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas – LAPPA, do Departamento de Engenharia Agrícola – DEAg, da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

A palma foi obtida em pequenas propriedades rurais próximas ao município de Campina Grande – PB.

Foram cortadas amostras medindo aproximadamente 6,0 x 6,0 cm, e posteriormente cortadas ao meio, perpendicularmente à sua altura, a fim de deixar exposto o interior da folha.

Após a colheita, as amostras foram encaminhadas ao processo de secagem em estufa circulação de ar do tipo FANEN 330, nas temperaturas de 40 a 70 °C. A massa seca foi determinada colocando-se amostras de cada experimento na mesma estufa a 105 ± 1 °C por 24 horas.

O coeficiente de difusão (D_{ef}) é uma difusividade efetiva, que engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais. O método Quasi-Newton [6] de análise de regressão não linear foi usado para ajustar os dados experimentais na equação de Fick.

Inicialmente foi pré-fixada a temperatura operacional, em seguida ligava-se o sistema. Uma vez atingido o regime, as amostras de palma forrageira, com umidade inicial conhecida, eram distribuídas em uma bandeja metálica, na estufa. Em períodos de tempos regulares as amostras foram retiradas, medidas com auxílio de um paquímetro e pesadas rapidamente e só então retornadas à estufa.

Este procedimento foi repetido até atingir peso constante.

A partir dos dados experimentais foram elaboradas as curvas de secagem para as temperaturas de 40 a 70 °C.

Resultados e Discussão

Na Tabela 1 estão dispostos os parâmetros do modelo de Fick, onde observa-se um decréscimo do parâmetro A , em função da temperatura. O inverso ocorre com a difusividade efetiva (D_{ef}).

Tabela 1 – Parâmetros do modelo de Fick para as duas temperaturas estudadas.

Temp. (°C)	A	D_{ef} (m/min)	R^2
40	1,16772	$2,85 \cdot 10^{-9}$	0,99418
50	1,04139	$5,89 \cdot 10^{-9}$	0,97594

Observa-se nas Figuras 1 e 2 as curvas de secagem de palma forrageira nas temperaturas de 40 e 50 °C, respectivamente.

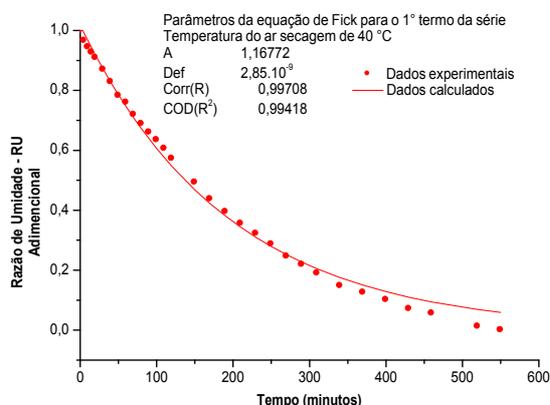


Figura 1 – Curva de secagem de palma forrageira, a 40 °C, ajustada pelo modelo de Fick.

correlação esteve acima de 0,99, como está mostrado nas Figuras 4 e 5.

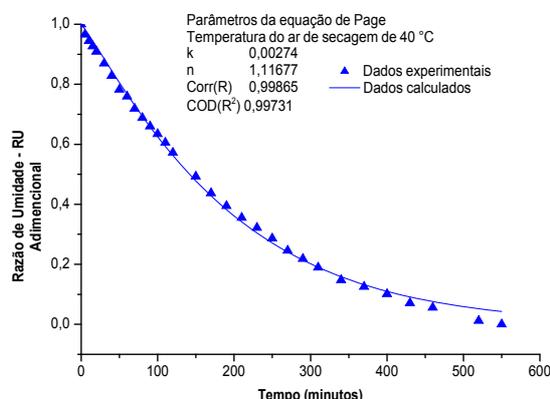


Figura 3 – Curva de secagem de palma forrageira, a 40 °C, ajustada pelo modelo de Page.

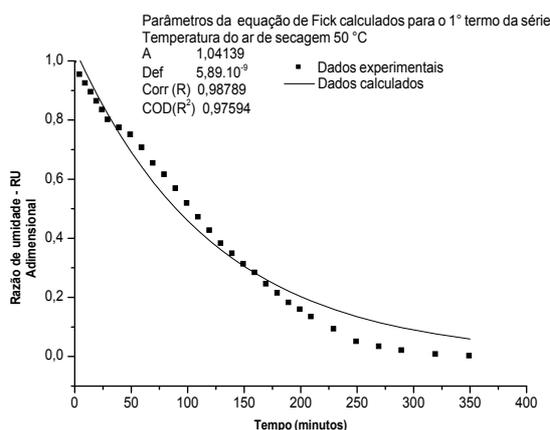


Figura 2 – Curva de secagem de palma forrageira, a 50 °C, ajustada pelo modelo de Fick.

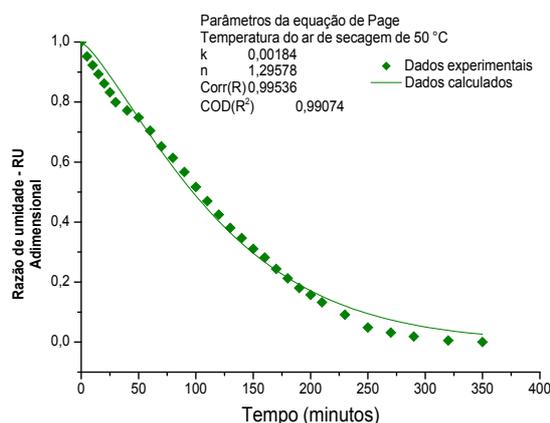


Figura 4 – Curva de secagem de palma forrageira, a 50 °C, ajustada pelo modelo de Page.

O melhor ajuste foi obtido na temperatura de 40 °C, onde, segundo a Tabela 1, os dados experimentais e preditos apresentam melhor correlação.

Na Tabela 2 estão dispostos os parâmetros do modelo de Page, onde observa-se um decréscimo do parâmetro k, em função da temperatura. O inverso ocorre com o parâmetro n.

Tabela 2 – Parâmetros do modelo de Page para as duas temperaturas estudadas.

Temp. (°C)	k	n	R ²
40	0,00274	1,11677	0,99731
50	0,00184	1,29578	0,99074

Para as temperaturas de 40 e 50 °C, houve um bom ajuste do modelo, onde o coeficiente de

Em ambos os modelos estudados, o melhor ajuste ocorreu na temperatura mais baixa. Este fato deve-se, provavelmente, ao mecanismo de transferência de massa envolvido, já que os modelos são comumente aplicados a transferências por difusão, que está relacionada com a estrutura da amostra, e as temperatura estudadas.

Em temperaturas maiores não foi observado um período expressivo de taxa decrescente durante a secagem, como está mostrado nas figuras 6 e 7.

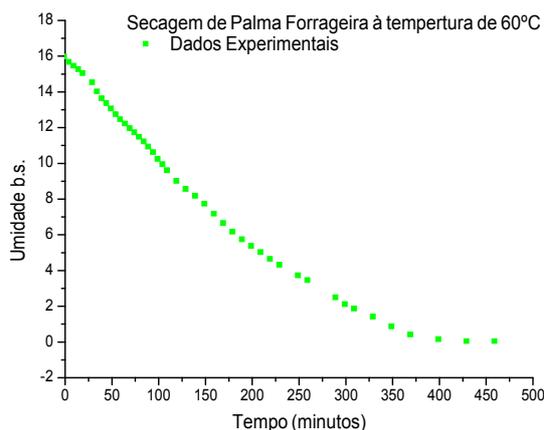


Figura 6 – Curva de secagem de palma forrageira, a 60 °C.

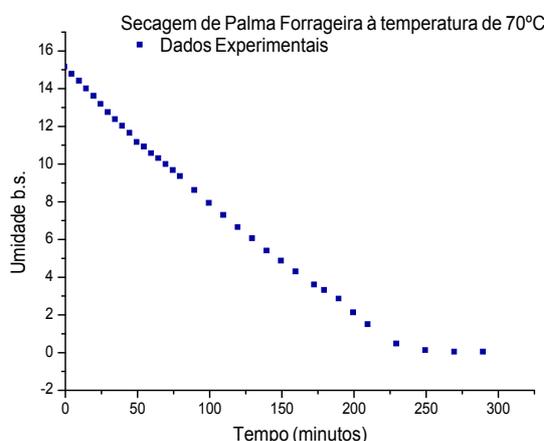


Figura 7 – Curva de secagem de palma forrageira, a 70 °C.

Nas temperaturas de 60 e 70 °C, não ocorreu convergência dos modelos, sugerindo outro mecanismo de transporte de massa.

Conclusões

Através dos dados obtidos, pôde-se concluir que em ambos os modelos estudados, o melhor ajuste ocorreu na temperatura mais baixa, o modelo de Page, para as temperaturas de 40 e 50 °C, ajustou as curvas com coeficiente de correlação acima de 0,99 e que nas temperaturas de 60 e 70 °C, não ocorreu convergência na modelagem dos dados experimentais.

Referências

[1] HAAG, H. P. Forragens na seca: algaroba, guandu e palma forrageira. Campinas: Fundação Cargill, 1986.137p.

[2] MEDEIROS, A. A; VASCONCELOS, S.H.L. & BARBOSA, L. Cactáceas: forrageiras para o semi-árido. Natal. EMPARN, 1981. 28p. (EMPARN, Boletim Técnico, 8).

[3] BARBERA, G. História e importância econômica e agroecológica. In: BARBERA, G.; INGLESE, P.; BARRIOS, E. P. Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira. Paraíba: SEBRAE, 2001. p. 1-11.

[4] SILVA, F.; PARK, K.J.; MAGALHÃES, P.M.; POZITANO, M. Estudo de secagem de carqueja (*Baccharis genistelloides* L.) XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, São Pedro – SP, 2004.

[5] Alsina, O. L.S.; Almeida, M.M.; Silva, Y.C.; SÁ, R.M.de Estudo do efeito das variáveis de operação na secagem de fatias de goiaba: aplicação de um modelo difusional. Anais do II Congresso de Engenharia de Processos do MERCOSUL 361p. 1999.

[6] STATISTICA for Windows 5.0. Computer Program Manual. Tulsa, OK: StatSoft, Inc., 1995.