

SECAGEM CONVECTIVA DE YACON: INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO E DA TEMPERATURA DE SECAGEM

F. J. LOPES^{1*}, R. E. MELLO JR¹, A.P.L. SILVEIRA¹, G. E. ALVES¹, J. R. J. JUNQUEIRA¹, J. L. G. CORRÊA¹

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências dos Alimentos

*e-mail: francemirlopes@yahoo.com.br

RESUMO

O yacon tem como principal carboidrato de reserva os frutooligossacarídeos, os quais têm sido recomendados em dietas para pessoas diabéticas e obesas. Porém, quando destinado ao consumo, deve ser processado ou consumido rapidamente. O objetivo deste trabalho foi estudar a cinética de secagem convectiva de fatias de yacon, avaliando as influências da temperatura e do uso de desidratação osmótica na difusividade e tempo de secagem. A desidratação osmótica com pulso de vácuo foi realizada com solução de sorbitol, 38°Brix a 35°C e de 74 mmHg de pulso de vácuo nos primeiros 10 minutos da desidratação. Foram testadas temperaturas de secagem de 40; 50; 60 e 70°C e velocidade do ar constante em 0,5 m/s. A cinética de secagem foi ajustada pelo modelo de Fick e a relação da difusividade com a temperatura pela equação de Arrhenius. Os resultados mostraram que a cinética de secagem do yacon é fortemente influenciada pela temperatura e também pela PVOD, com menor tempo de processo e maior difusividade efetiva em temperaturas mais elevadas e/ou quando a amostra é pré-tratada. Os modelos de Fick e Arrhenius apresentaram bom ajuste aos dados experimentais de cinética de secagem e variação de difusividade com a temperatura.

1 INTRODUÇÃO

A secagem é a operação unitária na qual ocorre eliminação de água por transporte simultâneo de calor e massa. É, provavelmente, o mais antigo método de conservação de alimentos. (PARK; LAMSAL; BALASUBRAMANIAM, 2014).

A secagem tem como objetivo promover a redução da atividade de água, proporcionando inibição do crescimento microbiano, diminuição da atividade enzimática e velocidades das reações químicas. Porém, a exposição do produto a temperaturas elevadas por longos períodos pode causar perdas de qualidade nutricionais e sensoriais. A desidratação osmótica seja a

pressão atmosférica ou com uso de pulso de vácuo (PVOD- *pulsed vacuum osmotic dehydration*) costuma auxiliar na minimização de perda de qualidade e levar a redução de tempo de secagem (FANTE et al., 2011; CORRÊA et al., 2014).

Na maioria dos processos osmóticos, são utilizadas soluções de sacarose (CORRÊA et al., 2010; ZOU et al., 2013). Porém, agentes como o sorbitol são favoráveis para a obtenção de alimentos para pacientes com restrições a aqueles produtos, como diabéticos e hipertensos. O sorbitol é um eficiente agente desidratante, pois proporciona uma alta razão de perda de água por ganho de sólidos (CHAUHAN et al., 2011).

A modelagem da cinética de secagem pode ser feita com o uso de modelos difusivos baseados na teoria da difusão de Fick (CRANK, 1975). Embora este modelo apresente deficiências como desconsiderar a resistência externa e não considerar o encolhimento do produto durante a secagem, o ajuste proporcionado pelo mesmo é bastante satisfatório e a difusividade obtida pelo ajuste auxilia na interpretação do processo de secagem (WALKER, L.; SENADEERA, W, 2014).

O presente trabalho teve como objetivo estudar a cinética de secagem convectiva de fatias de yacon, avaliando a influência da temperatura e do uso de PVOD na difusividade e tempo de secagem.

2 MATERIAL E METODOS

2.1 Material

Tubérculos de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) foram obtidos junto ao comércio local de Lavras, Minas Gerais. Para seleção da matéria-prima foram considerados o grau de maturação, tamanho, peso, intensidade de cor e firmeza uniformes. Além disso, a ausência de doenças, fissuras e outras injúrias físicas foram levadas em consideração.

Os tubérculos foram utilizados nos experimentos logo após sua aquisição.

2.2 Preparo das amostras e da solução osmótica

As raízes selecionadas foram lavadas em água corrente e descascados manualmente com uma faca de aço inox. As amostras foram cortadas em dimensões de 2,00 x 2,00 x 0,50 cm (comprimento x largura x espessura) utilizando-se um fatiador manual. As dimensões das fatias foram aferidas com um paquímetro digital (Western, 150mm-DC-60, China).

A solução osmótica foi preparada com água destilada e sorbitol comercial (Singsino

Goup Limited, China) em concentração de 38°Brix.

2.3 Condições experimentais

As amostras de yacon foram divididas em dois conjuntos. Em um deles, foi aplicado o tratamento osmótico anteriormente a secagem e o outro foi submetido à secagem sem pré-tratamento.

2.3.1 Desidratação osmótica assistida por pulsos de vácuo (PVOD)

As amostras foram acondicionadas em erlenmeyers contendo solução osmótica de sorbitol na proporção massa de yacon e massa de solução de 1:10 (w/w). A desidratação osmótica foi realizada a temperatura de 35°C e pressão de vácuo de 74 mmHg nos primeiro 10 min processo, com tempo total de 300 min. Estas condições foram otimizadas em trabalho anterior (OLIVEIRA, 2013), por proporcionarem maior retenção de frutanos.

Após a PVOD, as amostras foram retiradas dos erlenmeyers e imediatamente imersas em um banho de gelo por 10 segundos. A água de lavagem superficial foi removida por secagem da superfície com papel toalha. Este procedimento tem o objetivo de cessar a desidratação e retirar o excesso de solução desidratante da superfície da amostra (CORRÊA et., 2014).

As amostras foram acondicionadas em potes herméticos para posterior secagem. Parte das amostras foi submetida a determinação de teor de umidade para se avaliar a perda do teor de umidade no processamento osmótico.

2.3.2 Secagem

A secagem das amostras foi realizada num secador convectivo a 40; 50; 60 e 70°C e velocidade constante de 0,5 m s⁻¹ até teor de umidade final de 13 kg água/100 kg material seco. A massa das amostras foi medida em tempos pré-definidos para obtenção da cinética de secagem. A secagem foi mantida

até peso constante para a determinação do teor de umidade de equilíbrio.

2.4 Análises

2.4.1. Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi determinado segundo método gravimétrico 934.06 da (AOAC, 2005) em estufa a vácuo (pressão $\leq 100\text{mmHg}$) a 70°C até peso constante.

2.4.2 Atividade de água

A determinação da atividade de água foi realizada à temperatura de 25°C com o uso de um medidor de atividade de água (Aqualab Decagon Devices Inc. Pullman, modelo CX-2T, Washington, EUA).

2.5 Modelagem da cinética de secagem

O modelo utilizado nos ajustes da cinética de secagem do yacon baseia-se na equação de difusão de unidirecional Fick (CRANK, 1975):

$$\frac{\partial M(t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial M(t)}{\partial z} \right) \quad (1)$$

onde $M(t)$ é a quantidade de água ou de sólidos no instante t , D_{eff} é a difusividade efetiva e z é a direção da transferência.

O modelo de difusividade efetiva de Fick relaciona a variação do teor de umidade com o tempo e dimensões, de acordo com a lei de difusão de Fick pode ser resolvido considerando placa semi-infinito com espessura $2L$, teor de umidade inicial uniforme, $M_{(z,0)} = M_0$; a concentração de simetria, $\left. \frac{\partial M(t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$; e o teor de umidade de equilíbrio na superfície do material, $M_{(L,t)} = M_{\text{eq}}$; Como resultado, a equação de

difusão de Fick unidirecional (CRANK, 1975) torna-se:

$$MR = \frac{8}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{D_{\text{eff}} t}{L^2} \right] \quad (2)$$

onde D_{eff} é a difusividade efetiva de água, L é metade da espessura da amostra, n é o número de termos, MR é a razão de umidade, t é o tempo de secagem.

A razão de umidade (MR) foi definida como:

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_0 - M_e)} \quad (3)$$

onde M_t é o teor de umidade do yacon em cada momento, M_0 teor de umidade inicial do yacon e M_e o teor de umidade de equilíbrio.

A dependência de D_{eff} com a temperatura foi analisada pela equação de Arrhenius:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{RT} \right) \quad (4)$$

onde D_0 é o fator pré-exponencial da equação Arrhenius, E_a a energia de ativação (kJ mol^{-1}), R a constante universal dos gases, $8,314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ e a temperatura absoluta (K).

Os ajustes dos modelos de cinética de secagem e de dependência da difusividade com relação à temperatura aos dados experimentais foram obtidos com auxílio do suplemento Solver do software Excel.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desidratação osmótica com pulso de vácuo (PVOD)

A PVOD do yacon resultou na redução de teor de umidade inicial de $8,58 \pm 0,37$ kg água/ kg material seco para $2,44 \pm 0,19$ kg água/ kg material seco. Observa-se que houve também redução da atividade de água de $0,989 \pm 0,001$ para $0,976 \pm 0,004$, perda de água de 51,23% e ganho de sólido de 5,87%. Estes resultados estão de acordo com os dados obtidos por Oliveira (2013).

3.2 Secagem

As Figuras 1 e 2 apresentam as curvas das cinéticas de secagem do yacon com e sem pré-tratamento por PVOD, respectivamente, em função da razão de umidade (MR) e a Tabela 1 apresenta os tempos de secagem.

Figura 1. Cinética de secagem de yacon desidratados em PVOD

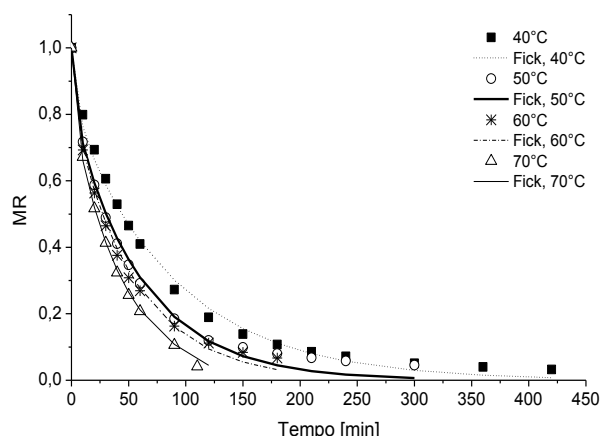
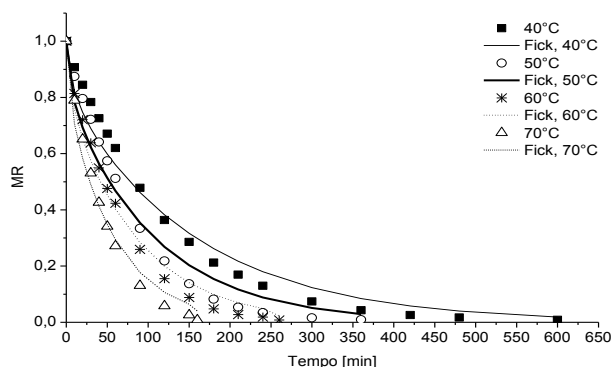


Figura 2. Cinética de secagem de yacon



Observa-se a temperatura levou a redução nos tempos de secagem, independentemente do uso de pré-tratamento. Adicionalmente, em todas as temperaturas, a razão de umidade reduziu mais rapidamente no início da secagem, com redução mais acentuada em maiores temperaturas. A influência da temperatura é bem relatada (DJENDOUBI MRAD et al., 2012; GIRI; PRASAD, 2007; VEGA-GÁLVEZ et al., 2012). O aumento de temperatura resulta em maior excitação de moléculas de água no interior do material com consequente maior difusividade e pressão de vapor mais elevada (SADEGHI et al., 2013).

A utilização da PVOD como pré-tratamento para a secagem convectiva proporcionou a redução do tempo de secagem quando comparadas com as amostras que não sofreram o pré-tratamento (Figura 1 e 2, Tabela 1), independente da temperatura. Embora o teor de frutanos não tenha sido medido neste trabalho, observa-se que a PVOD pode ter auxiliado na sua retenção, uma vez que o composto é termossensível e uma menor exposição períodos prolongados a temperaturas é interessante para este tipo de composto (SCHER; RIOS; NOREÑA, 2009).

3.3 Modelagem da cinética

Na Tabela 1, Figura 1 e 2 são apresentados os resultados dos ajustes do modelo de Fick aos dados experimentais. Pode-se observar que, em termos do coeficiente de determinação, o modelo de Fick representa bem a cinética de secagem do yacon, em todos os casos $R^2 > 0,98$ e variância acima de 97%.

Os valores da difusividade efetiva (D_{eff}) corroboraram o fenômeno da secagem, uma vez que apresentaram valores maiores para experimentos em que se utilizou a PVOD como pré-tratamento e em experimentos em que se utilizou maiores temperaturas (Tabela 1).

Os valores de D_{eff} estão de acordo com DOYMAZ (2008), $1,42 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para morangos e NOWACKA et al (2012), $1,89$ a $2,16 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para amostras de maçã seca pré-tratadas. Resultados diferentes aos relatados por DOYMAZ (2012), $7,05 \times 10^{-11}$ e $2,34 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para a secagem de caquis, e pela GUINÉ et al., (2011), $4,08 \times 10^{-8}$ e $2,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ na secagem convectiva de abóbora

em 30 e 70°C. A difusividade varia de acordo com características da amostra, como variedade, composição, geometria, temperatura do ar e pré-tratamento, o que explica algumas das diferenças encontradas nos resultados em comparação com alguns relatados na literatura.

Tabela 1 – Tempo de secagem, Coeficiente de difusividade efetiva (D_{eff}), coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e Variância (% Var) do modelo de Fick para as diferentes temperaturas estudadas.

Tempo de secagem		$D_{eff} \times 10^9 [\text{m}^2\text{s}^{-1}]$	R^2	RSME	% Var
Tratamento	[min]				
CP 40°C	420	0,8415	0,9968	0,017	99,58
CP 50°C	300	1,2278	0,9967	0,022	99,25
CP 60°C	180	1,3709	0,9971	0,020	99,34
CP 70°C	110	1,7103	0,9991	0,010	99,82
SP 40°C	600	0,4789	0,9894	0,041	97,97
SP 50°C	360	0,7044	0,9855	0,042	97,60
SP 60°C	260	0,8927	0,9924	0,027	98,85
SP 70°C	160	1,2910	0,9920	0,024	98,88

Onde CP significa secagem com pré-tratamento por PVOD e SP, secagem sem PVOD

A tabela 2 apresenta os valores do fator pré-exponencial (D_0) e energia de ativação (E_a) obtidos pelo ajuste de D_{eff} em função da temperatura pela equação de Arrhenius. Observou-se que o ajuste foi bastante satisfatório, com R^2 maiores que 0,95. Resultados semelhantes aos encontrados por TAHERI-GARAVAND et al., (2011) Além disso, os valores de E_a estão próximos ao encontrados por DOYMAZ et al., (2014) e se dentro da faixa de 12,7 a 110 kJ mol^{-1} definida por ZOGZAS et al., (1996) para produtos alimentícios.

Tabela 2 - Valores referentes a energia de ativação e fator pré-exponencial da equação de Arrhenius

Trat.	$E_a [\text{kJ mol}^{-1}]$	$D_0 [\text{m}^2\text{s}^{-1}]$	R^2	RSME
CP	20,07	$1,97 \times 10^{-6}$	0,95	0,053
SP	28,66	$2,92 \times 10^{-5}$	0,99	0,031

Onde CP significa secagem com pré-tratamento por PVOD e SP, secagem sem PVOD

4 CONCLUSÃO

O modelo teórico de Fick apresentou bom ajuste aos dados experimentais, R^2 médio de 0,99. Isso sugere que a consideração de processo difusivo é adequada na secagem de yacon com ou sem o processo de desidratação osmótica (PVOD).

Os valores da difusividade efetiva aumentaram de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem, sendo maiores nas mostras tratadas osmoticamente. Este aumento da difusividade resultou em menores tempos de secagem nas amostras pré tratadas.

A dependência da difusividade em relação à temperatura foi descrita pela equação de Arrhenius, por meio da qual se obteve o valor da energia de ativação de 20,07

e 28,66 kJ mol⁻¹ e RMSE de 0,053 e 0,031 respectivamente para as amostra com e sem o pré-tratamento.

NOMENCLATURA

D _{eff}	Difusividade efetiva [m ² s ⁻¹]
D _o	Fator pré-exponencial [m ² s ⁻¹]
E _a	Energia de ativação [kJ mol ⁻¹]
T	Temperatura [K e °C]
MR	Razão de umidade , adimensional
R	Constante universal dos gases [J mol ⁻¹ K ⁻¹]
t	Tempo [s]
<i>Subscritos</i>	
0	Referente à condição inicial
f	Referente à condição final
eq	Equilíbrio

REFERÊNCIAS

AOAC. **Official methods of analysis of Association of official Analytical Chemists International.**: Gainstherburg: Horwitz 2005.

CHAUHAN, O.; SINGH, A.; SINGH, A.; RAJU, P.; BAWA, A. Effects of osmotic agents on colour, textural, structural, thermal, and sensory properties of apple slices. **International Journal of Food Properties**, v.14, n.5, p.1037-104, 2011.

CORRÊA, J. L. G.; PEREIRA, L. M.; VIEIRA, G. S.; HUBINGER, M. D. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering**, v.96, n.4, p.498-504, 2010.

CORRÊA, J. L. G.; ERNESTO, D. B.; ALVES, J. G. L. F.; ANDRADE, R. S. Optimisation of vacuum pulse osmotic dehydration of blanched pumpkin. **International Journal of Food Science & Technology**, v.49, n.9, p.2008-2014, 2014.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Clarendon Press: Oxford. 1975.

DJENDOUBI MRAD, N.; BOUDHRIOUA, N.; KECHAOU, N.; COURTOIS, F.; BONAZZI, C. Influence of air drying temperature on kinetics, physicochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid of pears. **Food and Bioproducts Processing**, v.90, n.3, p.433-441, 2012.

DOYMAZ, İ. Convective drying kinetics of strawberry. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n. 5, p. 914-919, 2008.

DOYMAZ, İ. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). **Energy Conversion and Management**, v.56, p.199-205, 2012.

DOYMAZ, İ.; DEMIR, H.; YILDIRIM, A. Drying of Quince Slices: Effect of Pretreatments on Drying and Rehydration Characteristics. **Chemical Engineering Communications**, v.202, n.10, p.1271-1279, 2014.

FANTE, C.; CORRÊA, J.; NATIVIDADE, M.; LIMA, J.; LIMA, L. Drying of plums (*Prunus* sp, c.v Gulfblaze) treated with KCl in the field and subjected to pulsed vacuum osmotic dehydration. **International Journal of Food Science & Technology**, v.46, n.5, p.1080-1085, 2011.

GIRI, S. K.; PRASAD, S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. **Journal of Food Engineering**, v.78, n.2, p.512-521, 2007.

GRAEFE, S.; HERMANN, M.; MANRIQUE, I.; GOLOMBEK, S.; BUERKERT, A. Effects of post-harvest treatments on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian

Andes. **Field Crops Research**, v.86, n.23, p.157-165, 2004.

NOWACKA, M.; WIKTOR, A.; ŚLEDŹ, M.; JUREK, N.; WITROWA-RAJCHERT, D. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. **Journal of Food Engineering**, v.113, n.3, p.427-433, 2012.

OLIVEIRA, L. F. D. **Desidratação osmótica com pulsos de vacuo e secagem a vacuo de yacon**. (Tese Doutorado). Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, 2013.

PARK, S. H.; LAMSAL, B. P.; BALASUBRAMANIAM, V. 1 **Principles of Food Processing**. 2014.

SADEGHI, M.; MIRZABEIGI KESBI, O.; MIREEI, S. A. Mass transfer characteristics during convective, microwave and combined microwave-convective drying of lemon slices. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.93, n.3, p.471-478, 2013.

SCHER, C. F.; RIOS, A. D. O.; NOREÑA, C. P. Z. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. **International Journal of Food Science & Technology**, v.44, n.11, p.2169-2175, 2009.

TAHERI-GARAVAND, A.; RAFIEE, S.; KEYHANI, A. Study on effective moisture diffusivity, activation energy and mathematical modeling of thin layer drying kinetics of bell pepper. **Australian Journal of Crop Science**, v.5, n.2, p.128-131, 2011.

VEGA-GÁLVEZ, A.; AH-HEN, K.; CHACANA, M.; VERGARA, J.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J.; GARCÍA-SEGOVIA, P.; LEMUS-MONDACA, R.; DI SCALA, K. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. **Food Chemistry**, v.132, n.1, p.51-59, 2012.

WALKER, L.; SENADEERA, W. A variable diffusivity model for the drying of spherical food particulates. **Applied Mechanics and Materials**, v. 553, p. 94-99, 2014.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.

ZOU, K., TENG, J., HUANG, L., DAI, X., & WEI, B. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. **LWT-Food Science and Technology**, v.51, n.1, p.253-259, 2013.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico – CNPq, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, pelo apoio à pesquisa.