



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá  
Brasil

Fiorentin, Leila Denise; Menon, Bruna Tozetto; Alves, João Adriano; Davantel de Barros, Sueli Tereza;  
Pereira, Nehemias Curvelo; Módenes, Aparecido Nivaldo

Determinação da cinética e das isotermas de secagem do bagaço da laranja

Acta Scientiarum. Technology, vol. 32, núm. 2, 2010, pp. 147-152

Universidade Estadual de Maringá  
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226526011>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# Determinação da cinética e das isothermas de secagem do bagaço da laranja

Leila Denise Fiorentin\*, Bruna Tozetto Menon, João Adriano Alves, Sueli Tereza Davantel de Barros, Nehemias Curvelo Pereira e Aparecido Nivaldo Módenes

Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-990, Maringá, Paraná, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: leiladeniseff@hotmail.com

**RESUMO.** Conhecer o comportamento do bagaço de laranja durante a secagem é de suma importância quando se deseja utilizá-lo para fins tecnológicos, como é o caso de sua aplicação como adsorvente. Este trabalho teve como objetivo a determinação da cinética e das isothermas de secagem do bagaço da laranja. Para a obtenção das curvas de secagem e de taxa de secagem o bagaço foi seco em um secador convectivo, em uma faixa de temperatura de 33 a 92°C com velocidade do ar constante de 1,3 m s<sup>-1</sup>. As isothermas de equilíbrio foram determinadas utilizando o equipamento *Thermoconstant Novasina*, nas temperaturas de 25 a 45°C. A umidade do bagaço em base seca (b.s) foi determinada pelo método da estufa. As curvas de secagem e taxa de secagem mostraram que o aumento da temperatura diminuiu o tempo de secagem, pelo aumento da taxa de secagem. Nas isothermas de equilíbrio, o aumento da temperatura causou aumento da umidade de equilíbrio, fato este atribuído à característica do material. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de BET, SABBAH e OSWIN, e nas condições estudadas, o modelo de SABBAH foi o que melhor se ajustou, com o coeficiente de correlação de 0,99.

**Palavras-chave:** secagem, curvas de secagem, taxa de secagem, isothermas de secagem, modelagem.

**ABSTRACT.** Determination of drying kinetics and isotherms of orange bagasse. Knowing the behavior of orange bagasse during drying is very important when using it for technological purposes, as is the case of its application as an adsorbent. This work had as objective the determination of the kinetics and isotherms of orange bagasse drying. In order to obtain the drying and drying rate curves, the bagasse was dried in a convective drier, at temperatures from 33 to 92°C, with constant air speed of 1.3 m s<sup>-1</sup>. The equilibrium isotherms were determined using the *Thermoconstant Novasina* device, with temperatures between 25 and 45°C. The moisture of the bagasse on a dry basis (d.b.) was determined by the furnace method. The drying curves and drying rate curves showed that the increase in temperature decreased drying time, due to an increase in the drying rate. In equilibrium isotherms, the increase in temperature caused an increase in equilibrium moisture content, a factor attributed to the characteristic of the material. The experimental data were adjusted to the BET, SABBAH and OSWIN models; under the studied conditions, the SABBAH model presented the best adjustment, with a correlation coefficient of 0.99.

**Key words:** drying, drying curves, drying rates curves, drying isotherms, modeling.

## Introdução

A laranja é uma das frutas mais conhecidas, cultivadas e estudadas em todo o mundo, sendo o suco seu principal produto. Vários subprodutos com elevado valor comercial são obtidos durante o processamento do suco e entre eles estão os óleos essenciais, o limoneno e o farelo de polpa cítrica, obtido do bagaço da laranja que é um resíduo sólido industrial. Dependendo da variedade, uma laranja pode chegar a ter 46% de bagaço úmido, sendo atualmente o destino principal deste resíduo a alimentação animal.

O estudo de novas alternativas para o bagaço da laranja é de grande interesse para se obter melhor destinação deste resíduo. Khaled et al. (2009), Arami et al. (2005), Sivaraj et al. (2001) e Namasivayam et al. (1996) demonstraram que a casca da laranja pode ser transformada em um material adsorvente com características comparáveis ao carvão ativado obtido da decomposição térmica de madeiras, cascas vegetais etc. O adsorvente mais utilizado é o carvão ativado, principalmente pela elevada área superficial e a sua adaptabilidade a um grande número de processos industriais. Entretanto, segundo Annadurai et al. (2002), às vezes torna-se limitado seu uso pelo alto

custo. No caso dos resíduos agroindustriais como o bagaço de laranja, apesar de apresentar uma área superficial menor do que o carvão, seu uso se justifica principalmente pelo baixo custo, elevada disponibilidade e muitas vezes eles podem ser utilizados sem a necessidade de ativação.

Para a utilização do bagaço como adsorvente torna-se necessário, inicialmente, realizar a sua secagem. Desta forma, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo para avaliar as características cinéticas envolvidas no processo de secagem do bagaço, bem como determinar as isotermas de equilíbrio de secagem deste material.

## Material e métodos

### Obtenção da amostra

O bagaço de laranja foi fornecido por uma empresa processadora de suco de laranja da região de Paranavaí, no Norte do Estado do Paraná-Brasil e conservado em congelador à temperatura de  $-15 \pm 2^\circ\text{C}$ .

### Secagem convectiva

O módulo experimental utilizado consiste em um secador convectivo contendo um soprador que fornece o fluxo de ar, aquecido por meio de resistências elétricas, com vazão ajustada, ao interior de uma câmara fechada que possui uma abertura superior para saída do ar aquecido o qual passa através da amostra, conforme é apresentado na Figura 1.

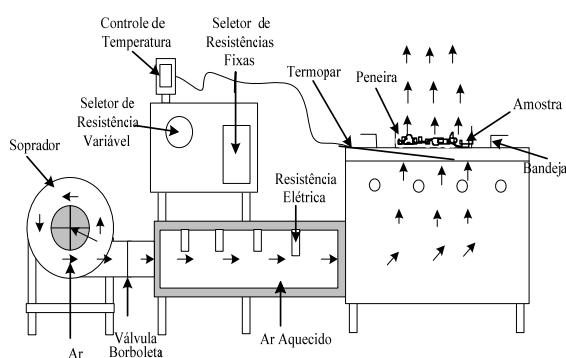


Figura 1. Módulo experimental, sistema convectivo LUZ et al., (2009).

A secagem convectiva do bagaço foi realizada em velocidade de ar constante de  $1,3 \pm 0,2 \text{ m s}^{-1}$  e temperaturas de  $33, 50, 66 \text{ e } 92 \pm 1^\circ\text{C}$ . A amostra foi pesada a cada 2 min. em balança de precisão: 0,0001 g, e o teor de umidade (b.s.) do bagaço determinado pelo método do peso constante em estufa a  $105^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

### Curvas de taxa de secagem

As curvas de taxa de secagem foram obtidas a partir da derivação das respectivas curvas de secagem pelo método das diferenças finitas centradas  $(\Delta X / \Delta t)$ , obtendo-se o valor da umidade nos pontos originalmente utilizados na construção das curvas de secagem, conforme Motta Lima et al. (2001). O procedimento de cálculo da taxa de secagem no ponto  $i$ , é como segue na Equação 1.

Para calcular  $(\Delta X / \Delta t)_{i-}$  entre  $i-1$  e  $i$

Para calcular  $(\Delta X / \Delta t)_{i+}$  entre  $i$  e  $i+1$

$$(\Delta X / \Delta t)_i = [(\Delta X / \Delta t)_{i-} + (\Delta X / \Delta t)_{i+}] / 2 \quad (1)$$

em que:

$$X_0 = (\Delta X / \Delta t)_0 \text{ ou } (\Delta X / \Delta t)_{1-}, \quad X_e = (\Delta X / \Delta t)_{X_e}, \quad X \text{ a}$$

umidade em um determinado tempo ( $\text{g H}_2\text{O g sól. seco}^{-1}$ ),  $X_0$  a umidade inicial ( $\text{g H}_2\text{O g sól. seco}^{-1}$ ),  $X_e$  a umidade no equilíbrio ( $\text{g H}_2\text{O g sól. seco}^{-1}$ ) e  $t$  o tempo (min.).

### Isotermas de equilíbrio

As amostras foram secas em estufa a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  por 24h. Em seguida, foram colocadas em dessecador por cerca de 60 min. e pesadas em balança analítica (precisão  $\pm 0,0001 \text{ g}$ ), determinando-se assim, sua massa seca.

As isotermas de equilíbrio foram determinadas nas temperaturas de  $25, 35 \text{ e } 45 \pm 0,2^\circ\text{C}$ , no *Thermoconstant Novasina* RTD-500, com precisão de  $\pm 0,003 a_w$  e  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ . O equipamento é constituído de uma câmara onde são colocadas as amostras para leitura da atividade da água em presença dos sais,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , até atingir o equilíbrio (SANTOS et al., 2008).

Em seguida, a amostra foi retirada e pesada para determinação da massa úmida e a umidade de equilíbrio calculada conforme ilustra Equação (2).

$$X \text{ (b.s.)} = \frac{M_{\text{úmida}} - M_{\text{seca}}}{M_{\text{seca}}} \quad (2)$$

em que:

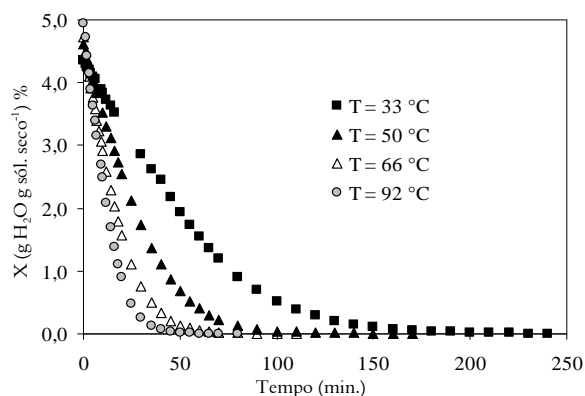
$X \text{ (b.s.)}$  a umidade da amostra em base seca,  $M_{\text{úmida}}$  a massa de amostra úmida (g) e  $M_{\text{seca}}$  a massa da amostra seca (g).

Em seguida, a mesma amostra foi levada novamente à câmara e colocada na presença de um sal de maior umidade e assim sucessivamente até obter todos os pontos da isoterma.

## Resultados e discussão

### Determinação de curvas de secagem e da taxa de secagem

A utilização do secador convectivo promove o controle do tempo de secagem. Na Figura 2 estão representadas as curvas de secagem obtidas experimentalmente.



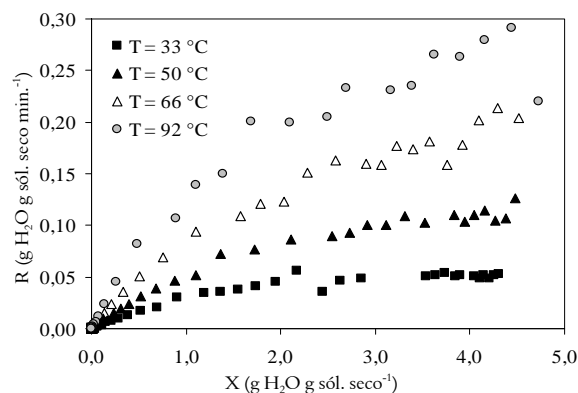
**Figura 2.** Curvas de secagem do bagaço de laranja, para as temperaturas de 33, 50, 66 e 92°C.

O aumento da temperatura de secagem acelera o processo, fazendo com que a amostra sofra redução de umidade mais rapidamente no início da secagem e consequentemente menor tempo de secagem é requerido, como é apresentado na Figura 2. Para a secagem do bagaço de laranja, deve-se, neste caso, utilizar menores temperaturas, 33 ou  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ , uma vez que, em temperaturas elevadas, podem ocorrer mudanças nas propriedades adsorptivas do material. Além disso, o uso de temperaturas mais baixas leva ao menor consumo de energia.

Durante a secagem do bagaço, a temperatura ambiente manteve-se em torno de  $27 \pm 2^\circ\text{C}$  e a umidade relativa do ar de  $57 \pm 2\%$ .

A Figura 3 apresenta as curvas da taxa de secagem do bagaço da laranja, obtidas a partir da derivação numérica das curvas de secagem, conforme descrito por Motta Lima et al. (2001).

Observa-se, na Figura 3, que para as temperaturas de 33 e  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ , as curvas de taxa de secagem apresentaram um período de taxa constante seguidas por um período decrescente, enquanto que nas temperaturas de 66 e  $92 \pm 1^\circ\text{C}$  houve a formação somente de um período decrescente. Provavelmente, em temperaturas elevadas, toda a água livre presente na superfície do bagaço de laranja, evapora rapidamente, impossibilitando a formação de um período de taxa constante.



**Figura 3.** Curvas de taxa de secagem do bagaço da laranja.

Na temperatura de  $33 \pm 1^\circ\text{C}$  a taxa de secagem no período de taxa constante que ocorre entre as umidades de 2,2 a 4,2 ( $\text{g H}_2\text{O g sól. seco}^{-1}$ ) foi de  $0,05 (\text{g H}_2\text{O g sól. seco min.}^{-1})$ , enquanto que na temperatura de  $92 \pm 1^\circ\text{C}$ , para umidades na faixa de 3,6 a 4,2 ( $\text{g H}_2\text{O g sól. seco}^{-1}$ ), a taxa de secagem foi de  $0,28 (\text{g H}_2\text{O g sól. seco min.}^{-1})$ . As curvas de taxa de secagem mostram que, no intervalo estudado, a influência da temperatura é evidente tanto no período de taxa constante, como no de taxa decrescente. Observa-se, ainda, na Figura 3, que a umidade crítica,  $X_c$ , definida como o valor onde se inicia o primeiro período de taxa decrescente, aumenta à medida que se tem aumento na taxa de secagem. Para a temperatura de  $33 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $X_c$  apresenta um valor de  $1,2 \text{ g H}_2\text{O g sól. seco}^{-1}$ , enquanto que para temperatura de  $66 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $X_c$  aumenta para  $2,4 \text{ g H}_2\text{O g sól. seco}^{-1}$ . Logo, a diminuição de  $X_c$ , torna o processo de secagem da amostra mais lento.

### Isotermas de equilíbrio

A Figura 4 apresenta as isotermas de equilíbrio, que relacionam a umidade de equilíbrio, ( $X_e$ ), em função da atividade da água, ( $a_w$ ), determinadas para o bagaço da laranja no equipamento *Thermoconstant Novasina* RTD-500.

Nota-se, na Figura 4, que o aumento da temperatura causou pequeno aumento na umidade de equilíbrio. Para  $a_w$  de aproximadamente 0,8 na temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , a umidade de equilíbrio foi de 0,12, enquanto que na temperatura de  $45^\circ\text{C}$   $X_e$  foi de 0,13.

Segundo Saltmarch e Labuzza (1980), para alimentos que contenham açúcar, em elevadas atividades de água, ocorre a dissolução do açúcar e o açúcar cristalino é convertido em um açúcar amorfo. A quantidade de água absorvida aumenta gradativamente depois desta transição, em virtude do aumento do número de sítios de adsorção na ruptura da estrutura cristalina do açúcar. Este processo é conhecido como endotérmico.

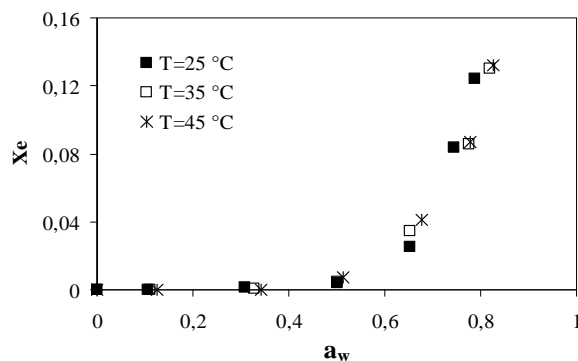


Figura 4. Isotermas de equilíbrio do bagoço.

Na tentativa de identificar, qual parte do bagoço da laranja é responsável por tal comportamento, foram determinadas as isotermas de equilíbrio para o albedo (parte branca e esponjosa da laranja), a membrana e a casca da laranja. Os resultados indicaram que para o albedo e a membrana, o aumento da temperatura causa diminuição da umidade de equilíbrio, enquanto, que para a casca, o aumento da temperatura aumenta a umidade de equilíbrio. Logo, evidencia-se que o comportamento obtido na Figura 4 é em grande parte pela presença da casca no bagoço. No fruto da laranja, a casca tem a finalidade de proteger, isto é, evitar a perda de umidade do interior do fruto para o ambiente, pois, se isso não ocorresse, a laranja poderia ter grande redução de umidade, quando a umidade ambiente fosse baixa.

Observa-se também, na Figura 4, que independente da temperatura, a amostra começa a absorver água a partir de uma atividade da água maior do que 0,5. Este fato evidencia que nas condições estudadas, a amostra seca poderia ser armazenada em um ambiente com atividade da água inferior a 0,5, sem absorver umidade.

#### Modelagem das isotermas

As isotermas de equilíbrio são descritas matematicamente por meio do ajuste dos modelos apresentados pelas Equações 3, 4 e 5, respectivamente.

Modelo de BET, segundo Delgado e Sun (2002):

$$X_e = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)[1 + (C - 1)a_w]} \quad (3)$$

Modelo de SABBAH, segundo Mesquita et al. (2001):

$$X_e = K \frac{(a_w)^B}{T^C} \quad (4)$$

Modelo de OSWIN, segundo Delgado e Sun (2002):

$$X_e = M \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^N \quad (5)$$

sendo,  $a_w$  a atividade da água ou umidade relativa (decimal),  $X_e$  a umidade de equilíbrio no sólido em b.s,  $X_m$  a quantidade da umidade na superfície da monocamada em b.s,  $C$ ,  $K$ ,  $B$ ,  $M$  e  $N$  constantes dos modelos a serem determinadas e  $T$  a temperatura de obtenção da isoterma (°C).

Os coeficientes dos modelos foram determinados com o auxílio do *software Statistica 6.0*® por regressão não-linear, utilizando o método de iteração Simplex, com critério de convergência 0,0001. A capacidade de adequação dos valores dos coeficientes dos modelos aos dados experimentais foi avaliada em relação ao coeficiente de correlação da equação ajustada  $R^2$  ao teste F e aos gráficos de resíduos.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 são apresentados os valores dos parâmetros obtidos para cada modelo.

Tabela 1. Parâmetros do modelo de BET.

T(°C)	X <sub>m</sub>	C	R <sup>2</sup>	F
25	0,095	0,095	0,9654	47,93
35	0,067	0,115	0,9923	211,7
45	0,068	0,108	0,9941	281,54

Como se observa nas tabelas, o modelo de SABBAH apresentou melhores resultados. Pode ser verificado aumento considerável dos valores dos coeficientes de correlação, justificado pelos maiores valores para o teste F, em todas as temperaturas estudadas.

Tabela 2. Parâmetros do modelo de SABBAH.

T(°C)	K	B	C	R <sup>2</sup>	F
25	0,14	7,77	-0,53	0,9982	921,0
35	0,10	6,36	-0,40	0,9971	451,8
45	0,11	6,05	-0,34	0,9943	1323

Tabela 3. Parâmetros do modelo de OSWIN.

T(°C)	M	N	R <sup>2</sup>	F
25	0,014	1,663	0,9787	81,73
35	0,016	1,386	0,9875	142,02
45	0,017	1,320	0,9876	148,43

Quanto ao modelo de BET, observa-se que  $X_m$  diminui com o aumento da temperatura.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os gráficos de resíduos para o modelo de SABBAH.

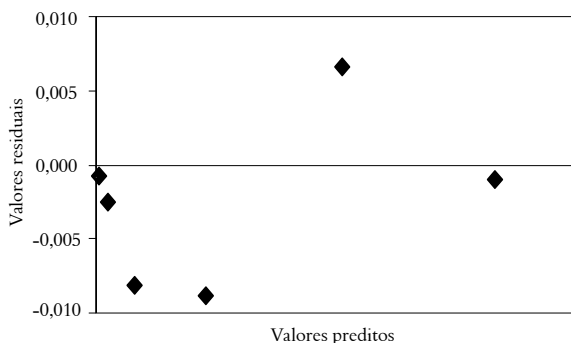


Figura 5. Resíduos estimados na temperatura de  $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Observa-se nas Figuras 5, 6 e 7 boa distribuição aleatória dos resíduos em torno do zero, evidenciando que o modelo de SABBAH pode representar as isotermas de equilíbrio de umidade do bagaço da laranja nas condições experimentais estudadas.

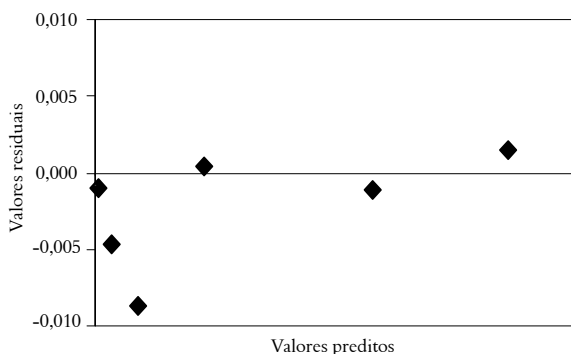


Figura 6. Resíduos estimados na temperatura de  $35 \pm 0,2^\circ\text{C}$ .

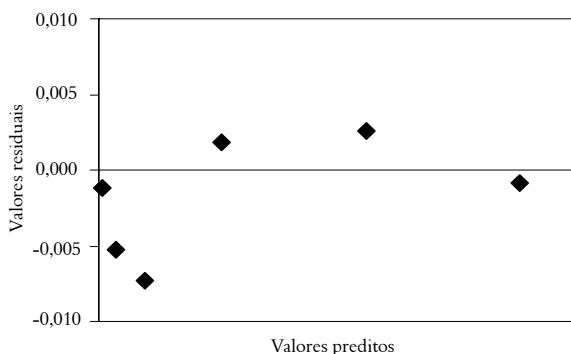


Figura 7. Resíduos estimados na temperatura de  $45 \pm 0,2^\circ\text{C}$ .

A Figura 8 apresenta o gráfico de superfície de resposta da umidade de equilíbrio previsto pela equação de SABBAH, em função da atividade da água e da temperatura.

Observa-se, na Figura 8, boa concordância entre os dados experimentais e os previstos pelo modelo, com valores de umidade de equilíbrio de mínimo e de máximo.

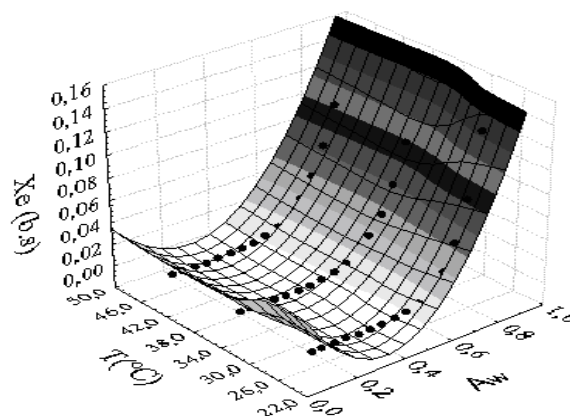


Figura 8. Superfície de resposta do modelo de SABBAH.

## Conclusão

Com base nos estudos realizados, a secagem convectiva do bagaço mostrou que quanto maior a temperatura de secagem, menor o tempo de secagem, justificado pela maior taxa de secagem. As curvas de taxa de secagem mostraram que a temperatura de secagem influencia tanto o período de taxa constante, como o de taxa decrescente. As isotermas de equilíbrio para o bagaço indicaram que quanto maior a temperatura, maior é a umidade de equilíbrio e por meio da análise das isotermas de equilíbrio para o albedo, a membrana e a casca da laranja, observou-se que o responsável por tal comportamento é a casca da laranja. Em relação ao ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais da isoterma de equilíbrio, o modelo de SABBAH foi o que melhor representou o equilíbrio do sistema.

## Referências

- ANNADURAI, G.; JUANG, R. S.; LEE, D. J. Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials**, B92, p. 263-274, 2002.
- ARAMI, M.; LIMMAE, N. Y.; MAHMOODI, N. M.; TABRIZI, N. S. Removal of dyes from colored textile wastewater by orange peel adsorbent: equilibrium and kinetic studies. **Journal Colloid and Interface Science**, v. 288, p. 371-376, 2005.
- DELGADO, A. E.; SUN, D. W. Desorption isotherms and glass transition temperature for chicken meat. **Journal of Food Engineering**, v. 55, p. 1-8, 2002.
- KHALED, A.; NEMR, A. E.; EL-SIKAILY, A.; ABDELWAHAB, O. Direct yellow 12 by orange peel carbon. **Desalination**, v. 238, p. 210-232, 2009.
- LUZ, G. R.; PEREIRA, N. C.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M. Scientific note: mass transfer coefficient in the drying of soybean meal. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 12, n. 2, p. 92-96, 2009.

- MESQUITA, J. B.; ANDRADE, E. T.; CORRÊA, P. C. Modelos matemáticos e curvas de umidade de equilíbrio de sementes de jacarandá-da-bahia, angico-vermelho e óleo-copaíba. **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 12-21, 2001.
- MOTTA LIMA, O. C.; STENZEL, M.; PEREIRA, C. N.; MENDES, E. S. Secagem condutiva/conectiva de celulose e fibra longa com ar ambiente em convecção forçada. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 23, n. 6, p. 1389-1399, 2001.
- NAMASIVAYAM, C.; MUNIASAMY, N.; GAYATRI, K.; RANI, M.; RANGANATHAN, K. Removal of dyes from aqueous solutions by cellulosic waste orange peel. **Bioresource Technology**, v. 57, n. 1, p. 37-43, 1996.
- SALTMARCH, M.; LABUZZA, T. P. Influence of relative humidity on the physiochemical state of lactose in spray-dried sweet whey powders. **Journal of Food Science**, v. 45, n. 5, p. 1231-1236, 1980.
- SANTOS, J. C. O.; MOTTA LIMA, O. C.; PEREIRA, N. C.; SOUSA, L. H. C. D. Estudo da cinética e isoterma de tecido composto por poliéster e algodão. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 30, n. 1, p. 63-72, 2008.
- SIVARAJ, R.; NAMASIVAYAM, C.; KADIRVELU, K. Orange peel as an adsorbent in the removal of acid violet 17 (acid dye) from aqueous solutions. **Waste Management**, v. 21, p. 105-110, 2001.

*Received on September 14, 2009.*

*Accepted on March 19, 2010.*

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.