

DETERMINAÇÃO DO EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO E DO CALOR ISOSTÉRICO DA POLPA E DA CASCA DO ABACAXI (*ANANAS COMOSUS*)¹

Luciana P. Teixeira²
Ednilton T. de Andrade³
Paula Gomes L. da Silva⁴

Resumo: Com o intuito de analisar a dinâmica de sorção e de energia necessária para o processamento do abacaxi (*Ananas comosus*), o presente trabalho teve como objetivo a determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico da casca e da polpa do abacaxi, a partir de diferentes condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar, assim como avaliar, dentre diversos modelos descritos na literatura, o que melhor representa o comportamento de sorção do abacaxi e da casca do abacaxi, e o calor latente de vaporização da água nos produtos analisados. Como resultado, foi verificado que o modelo que melhor se ajustou aos dados empíricos do processo de sorção do abacaxi foi o Modelo de GAB Modificado, com coeficiente de determinação de 99,2%, enquanto que para a casca do abacaxi foi o Modelo de Halsey Modificado, com coeficiente de determinação de 98,6%. Já, em relação ao calor isostérico, a equação empírica mostrou-se adequada para a polpa e casca do abacaxi, cuja necessidade energética variou, respectivamente, de 2386,11 a 2913,93 kJ kg⁻¹, e 2411,665 a 2909,325 kJ kg⁻¹.

Palavras-chave: abacaxi, higroscopicidade, calor isostérico.

Abstract: In order to analyze the dynamics of sorption and energy needed to process of the pineapple (*Ananas comosus*), this study objectived determine experimentally the sorption isotherms and the energy involved in of the process of dehydrating the pulp and the peel of the pineapple, from different controlled conditions of temperature and relative humidity, and assess, among various models described in the literature, which best represents the behavior of sorption of pineapple and the peel of the pineapple and its latent heat of vaporization of water in the products analyzed. As a result, it was verified that the model that best fitted the empirical data of sorption of pineapple was the Modified GAB model, with coeficient of determination of the 99.2%, while for the peel of the pineapple was the Modified Halsey model, with coeficient of determination of the 98.6%. Already, for the isosteric heat, the empirical equation was found to be suitable for pulp and peel pineapple, whose energy needs varied, respectively, of 2386.11 a 2913.93 kJ kg⁻¹, and 2411.665 a 2909.325 kJ kg⁻¹.

Keywords: pineapple, higroscopicity, isosteric heat.

¹ Determination of hygroscopic equilibrium and of the isosteric heat of the pulp and peel of the pineapple (*Ananas comosus*)

² Engenheira Agrícola. Mestranda em Engenharia Mecânica pelo PGMEC-UFF. Professora substituta do Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente da UFF. Endereço profissional: Rua Passo da Pátria, n. 156, bloco D, sala 205, São Domingos, Niterói-RJ. e-mail: lucianapteixeira@yahoo.com.br

³ Engenheiro Agrícola; Professor associado do Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente da Universidade Federal Fluminense

⁴ Engenheira Agrícola pela Universidade Federal Fluminense

1. INTRODUÇÃO

Popularmente conhecido como Ananás, o Abacaxi (*Ananas comosus*) é uma fruta típica de regiões tropicais e subtropicais. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), o Brasil é o maior produtor mundial, respondendo por 13,4% do total anual no período de 2001 a 2006 (IBGE, 2007).

Sua polpa e sua casca são largamente utilizadas em todo o mundo, tanto na forma de produto processado industrialmente como também *in natura*. Para a indústria, a utilização do abacaxi se baseia principalmente no uso do produto seco, visto sua alta suscetibilidade à deterioração (Drouzas & Shubert, 1996). Por isso, condições de umidade relativa do ar e temperatura ambiente devem ser consideradas, visto que interferem diretamente no teor de água de equilíbrio do produto e, conseqüentemente, na sua qualidade e condições de processamento e armazenamento.

Com o intuito de amenizar as alterações físicas, químicas e microbiológicas que podem ocorrer durante o armazenamento de produtos agrícolas, como o abacaxi, se faz necessário o conhecimento das relações existentes entre o produto, a temperatura e a umidade relativa do ar. Da mesma forma, a fim de garantir a otimização integral do processo, se analisar a eficiência, planejar a produção e necessidade energética, se faz útil o conhecimento das características caloríficas do abacaxi.

Dessa maneira, o presente trabalho se objetiva à determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico, respectivamente, da polpa e da casca do abacaxi, a partir de diferentes combinações de temperatura e umidade relativa do ar, assim como avaliar, dentre os modelos descritos na literatura, o que melhor represente o comportamento de sorção do abacaxi e da casca do abacaxi, e o calor latente de vaporização da água nos produtos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ, pelo Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente; para a realização dos testes e análises foram utilizados o Laboratório de Lumino-técnica (LabLux), vinculado ao Departamento de

Engenharia Elétrica, e Laboratório de Termociências (Latermo), pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica.

Para a realização do estudo, foram analisadas separadamente a polpa e a casca do abacaxi, da variedade Pérola. A polpa foi cortada em fatias de aproximadamente 1,5 cm de espessura, enquanto que a casca foi cortada em tiras de 3 cm de largura de modo à proporcionar maior uniformidade de secagem.

Ambas as amostras foram expostas por 72 horas em secador de laboratório à temperatura de 45°C para a retirada de parte da água do produto a fim de facilitar seu posterior manuseio. Após serem retiradas do secador, as cascas foram picadas ao acaso com a utilização de um liquidificador industrial, enquanto a polpa foi picada manualmente em pedaços uniformes. Em seguida, as amostras foram embaladas separadamente, em recipientes hermeticamente fechados e acondicionados em geladeira onde permaneceram ao longo de toda pesquisa.

Os testes de higroscopicidade foram realizados em Câmara Climática WEISS TECHNIK, modelo WK 111 com controle de temperatura e umidade relativa do ar. Para cada teste de equilíbrio higroscópico foram utilizadas amostras que variavam de, aproximadamente, 1 a 4g para a polpa e 1 à 2 g para a casca, colocadas em placas de “Petri” de 120 mm, de forma a garantir uma maior superfície de contato do material com o ambiente.

O equilíbrio higroscópico foi determinado por meio do método dinâmico. A aferição dos valores de umidade relativa e temperatura foram feitas por meio de um termohigrógrafo digital e dois termômetros (bulbo seco e bulbo molhado). As combinações de temperatura e umidade relativa dos experimentos foram obtidas a partir das condições de funcionamento da câmara, sendo utilizadas combinações entre dez umidades relativas do ar ambiente na câmara regulados de 10%; 12%, 17%, 18%, 30%, 40%, 45%, 50%, 60% e 85% e quatro temperaturas 20°C, 40°C, 55°C e 70°C, por 24 horas.

Para a verificação e quantificação dos fenômenos de sorção e dessorção, ainda em laboratório, as amostras foram pesadas antes e depois de serem, respectivamente, colocadas e retiradas da câmara, após entrarem em equilíbrio térmico com o ambiente circundante em condições her-

méticas. As pesagens foram realizadas em balança analítica com precisão de 3 casas decimais. Dessa maneira, foram verificados os diversos teores de água de equilíbrio para as várias combinações de temperatura e umidade relativa. Para um melhor tratamento dos dados foram utilizadas, para cada combinação de umidade relativa do ar e temperatura, a média de 4 repetições.

2.1 EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO

Os modelos matemáticos obtidos na literatura e representativos da higroscopicidade de produtos agrícolas, utilizados neste trabalho para

a análise da casca e da polpa do abacaxi, foram escolhidos aleatoriamente em função da avaliação da temperatura e umidade relativa do ambiente, para a verificação do que melhor se ajusta à realidade empírica do produto, de maneira a melhor representar sua isoterma (Pfof et al., 1976; Sokhansanj et al., 1986; Pereira & Queiroz, 1987; Chen & Morey, 1989a; Chen & Morey, 1989b; Mazza & Jayas, 1991; Brooker et al., 1992; Corrêa et al., 1995; Morey et al., 1995; Sokhansanj & Yang, 1996; Chen & Jayas, 1998; Corrêa et al., 1998; ASAE, 1999). Os modelos utilizados estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos utilizados para a verificação do comportamento da isoterma

Modelo	Equação	
Chung Pfof	$U_e = a - b \ln[-(T + c) \ln(a_w)]$	(1)
Copace	$U_e = \exp[a - (bT) + (ca_w)]$	(2)
GAB Modificado	$U_e = \frac{ab(c/T)a_w}{\{[1 - ba_w][1 - ba_w + b(c/T)a_w]\}}$	(3)
Halsey Modificada	$U_e = [\exp(a - bT) / - \ln(a_w)]^{1/c}$	(4)
Henderson	$U_e = [\ln(1 - a_w) / (- aT_{abs})]^{1/c}$	(5)
Henderson Modificada	$U_e = \{\ln(1 - a_w) / [- a(T + b)]\}^{1/c}$	(6)
Oswin	$U_e = (a - bT) / [(1 - a_w) / a_w]^{1/c}$	(7)
Sabbab	$U_e = a (a_w^b / T^c)$	(8)
Sigma Copace	$U_e = \exp\{a - (bT) + [c \exp(a_w)]\}$	(9)

U_e - Teor de água do produto, em b.s.; a_w - Atividade de água, decimal; T- Temperatura do ar ambiente, °C; T_{abs} - Temperatura absoluta do ar ambiente, K; a, b, c - Parâmetros que dependem da natureza do produto

De acordo com Sauer (1995) e Jayas et al. (1995), para a análise dos dados foi considerada a atividade de água (a_w) como sendo igual a umidade relativa do ar, em decimal. Para estimar os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais foi utilizado o programa STATISTICA 5, com modelagem não linear pelo método Quasi-Newton.

Para a determinação dos modelos que melhor representaram a higroscopicidade da polpa e casca do abacaxi, os dados experimentais foram

comparados com os valores estimados para cada modelo, verificando-se a porcentagem de erro médio relativo (P) e o erro médio estimado (SE), de acordo, respectivamente, com as Eqs. 10 e 11.

$$P = \frac{100}{n} \times \sum (|Y - \hat{Y}|/Y) \quad (10)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (11)$$

Y- Valor observado experimentalmente; \hat{Y} - Valor calculado pelo modelo; GLR – Grau de liberdade do modelo.

A capacidade do modelo em descrever com fidelidade o processo físico é inversamente proporcional ao valor de SE (Draper & Smith, 1981; Douglas & Donald, 1988; Chen & Moorey, 1989b; Chen & Jayas, 1998). Sendo assim, o grau de ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais será baseado na magnitude do coeficiente de determinação ajustado e dos erros médios relativo e estimado.

2.2 CALOR ISOSTÉRICO

A água presente em produtos higroscópicos pode ser caracterizada como de fácil ou difícil retirada. A primeira se apresenta livre podendo estar aderida superficialmente sob a superfície do material ou retida por forças capilares, sendo a segunda sob a forma de moléculas de água quimicamente ligadas à matéria seca.

Em um produto exposto a uma condição onde há perda de água, inicialmente a energia fornecida para a retirada da água é menor do que aquela que deverá ser fornecida ao final do processo. Isto se deve a condição de que ao logo do tempo há o decaimento da disponibilidade de água, ficando cada vez mais difícil a sua retirada, fazendo-se necessário uma demanda cada vez maior de energia.

De acordo com Wang & Brennan (1991), o calor isostérico de dessorção é definido como sendo a energia adicional necessária para remover a água associada a um material higroscópico, sendo esta superior à necessária para vaporizar uma igual quantidade de água livre, sob as mesmas condições de temperatura e pressão.

Assim, segundo Gouveia *et al.* (1999), é possível avaliar o estado de água presente no produto e em sua microestrutura, e, consequentemente, as mudanças físicas que acontecem em sua superfície. A temperatura e, principalmente, o teor de água do produto são as variáveis que influenciam diretamente no valor do calor latente de vaporização da água do produto (Brooker *et al.*, 1992).

Por este motivo, a análise do calor isostérico da polpa e casca do abacaxi foi realizada em função das respectivas curvas representativas dos teores de água e equilíbrio higroscópico do modelo matemático que melhor se ajustou aos dados experimentais dos produtos analisados.

O calor isostérico líquido de sorção (Q_{st}) é o calor adicional necessário para remover a água associada ao produto em si. Para seu cálculo, foram aplicados o modelo exponencial de Sopade e Ajisegiri (Eq. 12), que representa o comportamento do calor isostérico de sorção em função apenas do conteúdo de teor de água de equilíbrio (Silva *et al.*, 2002), e a equação de Clausius-Clapeyron, Eq. 13, modificada por Wang & Brennan (1991), que considera além do teor de água de equilíbrio também a temperatura.

$$q_{st} = A \exp(-B U_e) \quad (12)$$

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{q_{st}/R}{T_{abs}}\right) + C \quad (13)$$

q_{st} - Calor isostérico líquido de sorção, kJ kg⁻¹; U_e - Teor de água de equilíbrio, base seca em decimal; a_w - Atividade de água, decimal; T_{abs} - Temperatura absoluta, K; R - Constante universal dos gases, 8,314 kJ kmol⁻¹ K⁻¹, sendo para o vapor d'água 0,4619 kJ kg⁻¹ K⁻¹; A, B e C - Coeficientes de ajuste.

Na Equação 13, o calor isostérico líquido de sorção foi determinado a partir das inclinações das curvas do gráfico $\ln(a_w) \times (1/T_{abs})$ para os diversos teores de água de equilíbrio, em b.s., a partir do modelo matemático que melhor se ajustou aos dados experimentais, como descrito na Eq. 14.

$$\ln(a_w) = -(\text{Inclinação da reta})/T_{abs} + C$$

$$q_{st} = (\text{inclinação da reta}) \cdot R \quad (14)$$

O calor isostérico integral de sorção é a soma do calor isostérico líquido de sorção com o calor latente de vaporização de água livre (L), ou seja, para remover a água associada a um produto é necessário, além de fornecer a energia adicional para desprender a água de suas moléculas, também deve-se fornecer energia suficiente para vaporizar a água. A Equação 15 é recomendada por Brooker *et al.* (1992) para determinar o calor latente de vaporização da água livre.

$$L = 2502,2 - 2,39 \cdot T_m \quad (15)$$

L - Calor latente de vaporização da água livre, kJ kg⁻¹; T_m - Temperatura média na faixa de estudo, em °C.

A partir dos dados expostos anteriormente é possível, então, determinar o calor isostérico integral de sorção (Q_{st}).

$$Q_{st} = q_{st} + L \quad (16)$$

$$Q_{st} = A \exp(-B U_e) + L \quad (17)$$

Q_{st} - Calor isostérico integral de sorção, kJ kg^{-1} ; L - Calor latente de vaporização da água livre, kJ kg^{-1} ; U_e - Teor de água de equilíbrio, base seca em decimal; A e B - Coeficientes de ajuste.

3. RESULTADOS

3.1 EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO

Os dados experimentais de teor de água de equilíbrio higroscópico da casca e da polpa do abacaxi, obtidos a partir de combinações aleatórias entre as umidades relativas do ar ambiente e temperaturas em função das condições limites da máquina, estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios dos teores de água de equilíbrio (b.s.) para as diferentes combinações de umidade relativa do ar ambiente (%) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$), em 24 horas

Casca do Abacaxi		
Umidade Relativa (%)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Teor de água de equilíbrio média (b.s.)
18	55	0,0610
30	40	0,0866
30	55	0,0804
30	70	0,0747
40	20	0,1183
45	40	0,1193
45	55	0,1108
45	70	0,1029
50	20	0,1470
60	20	0,1865
60	40	0,1690
60	55	0,1570
60	70	0,1458
85	20	0,4557
85	40	0,4129
85	55	0,3835
85	70	0,3562

Polpa do abacaxi		
Umidade Relativa (%)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Teor de água de equilíbrio média (b.s.)
10	55	0,0844
12	70	0,0815
17	40	0,1184
18	55	0,0995
30	40	0,1308
30	55	0,1113
30	70	0,0948
40	20	0,1615
45	40	0,1557
45	55	0,1361
45	70	0,1175
50	20	0,1788
60	20	0,2046
60	40	0,1947
60	55	0,2086
60	70	0,2148
85	20	0,5763
85	40	0,6188
85	55	0,6386
85	70	0,6256

A partir dos valores médios do teor de água de equilíbrio higroscópico foram obtidos os pontos experimentais utilizados para a análise das curvas de sorção da casca e da polpa do abacaxi para as diferentes temperaturas utilizadas.

Para a análise da modelagem representativa de equilíbrio higroscópico foram utilizados

os modelos descritos na Tabela 1. Para análise de cada modelo foram determinados seus respectivos parâmetros, coeficientes de determinação (R^2), erros médio relativo (P) e estimado (SE). Na Tabela 3 estão apresentados os resultados dos parâmetros estimados relacionados aos modelos de equilíbrio higroscópico para a casca e a polpa do abacaxi.

Tabela 3. Parâmetros estimados, coeficientes de determinação (R^2), e erros médios relativo (P) e estimado (SE) da casca e da polpa do abacaxi, para cada modelo analisado

Modelo	Casca do Abacaxi				Polpa do Abacaxi			
	Parâmetros	R^2	P (%)	SE (decimal)	Parâmetros	R^2	P (%)	SE (decimal)
Chung Pfost	a = 0,8982	0,919	24,5003	0,1041	a = 3,0069	0,865	41,7608	0,2334
	b = 0,1552				b = 0,2080			
	c = 130,3267				c = 881632,4			
Copace	a = -3,3960	0,972	14,7308	0,0618	a = -3,5460	0,970	21,6185	0,1113
	b = 0,0048				b = -0,0012			
	c = 3,1693				c = 3,5112			
GAB Modificado	a = 0,0996	0,975	12,9359	0,0576	a = 0,0813	0,992	7,6517	0,0533
	b = 0,9117				b = 1,0210			
	c = 130,9357				c = 4475,7613			
Halsey Modificado	a = -2,6981	0,986	8,6480	0,0432	a = -2,4380	0,988	13,0328	0,0686
	b = 0,0063				b = -0,0012			
	c = 1,2820				c = 1,1454			
Henderson	a = 0,0139	0,964	17,4737	0,0980	a = 0,0094	0,932	28,6865	0,2303
	c = 0,9176				c = 0,8649			
Henderson Modificado	a = 0,0201	0,967	16,6233	0,0670	a = 0,0024	0,949	28,2667	0,1420
	b = 177,2481				b = 1167,2958			
	c = 0,9259				c = 0,8397			
Oswin	a = 0,1386	0,969	14,6376	0,0651	a = 0,1673	0,976	19,8272	0,0980
	b = -0,0002				b = 0,0002			
	c = 1,5287				c = 1,4045			
Sabbah	a = 1,1103	0,935	23,4056	0,0933	a = 0,7105	0,911	38,3759	0,1835
	b = 2,0171				b = 2,3187			
	c = 0,1921				c = -0,0541			
Sigma Copace	a = -4,5265	0,982	10,4650	0,0486	a = -4,8479	0,984	14,4299	0,0784
	b = 0,0049				b = -0,0011			
	c = 1,6389				c = 1,8381			

De acordo com Mohapatra e Rao (2005), os modelos com erro médio relativo (P) superiores a 10% não apresentam um ajuste satisfatório aos dados experimentais, não representando adequadamente o fenômeno analisado. O mesmo é recomendado por Lomauro *et al.* (1985), que ainda acrescenta que os valores de R^2 devem ser o mais próximo da unidade.

Considerando a análise dos resultados de equilíbrio higroscópico da casca e da polpa do abacaxi, expostos na Tabela 3, é possível verificar que o Modelo de Halsey Modificado para a casca do abacaxi e GAB Modificado para a polpa do

abacaxi foram os modelos que melhor representaram os respectivos fenômenos, com coeficientes de determinação de 0,986 para a casca e 0,992 para a polpa, tendo a casca apresentado erros médios relativos e estimado de, respectivamente, 8,65% e 0,0432, e a polpa, respectivamente, 7,65% e 0,0533. Para uma melhor verificação da representatividade dos modelos aos respectivos fenômenos da higroscopicidade, a Figura 1 apresenta os valores experimentais do teor de água de equilíbrio e os valores calculados das isotermas de sorção dos modelos que melhor se ajustaram às curvas experimentais.

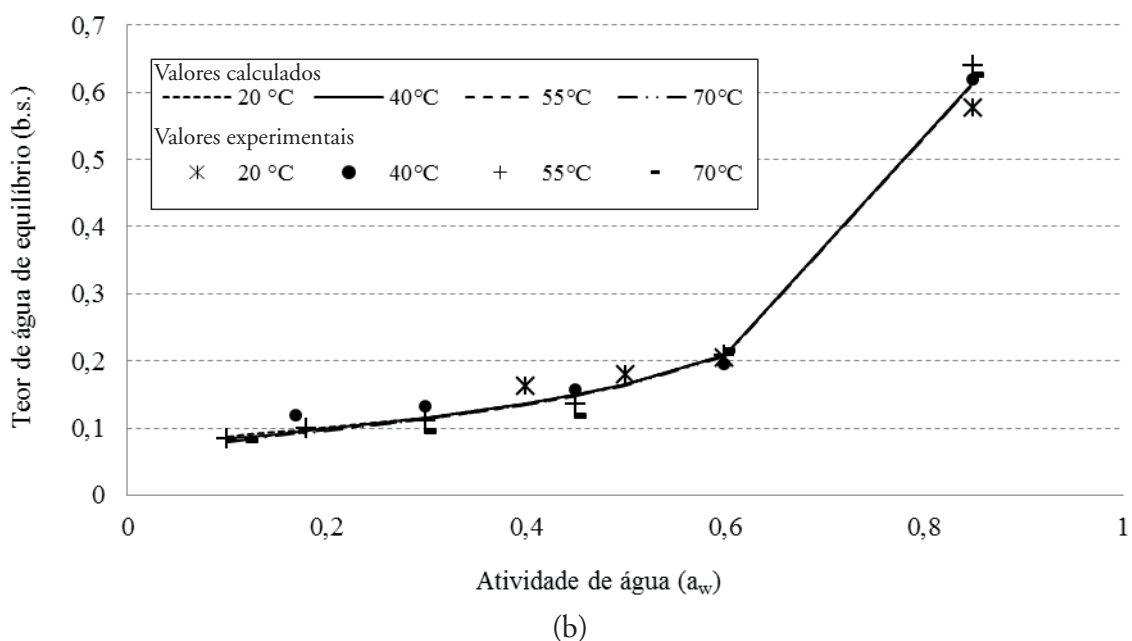
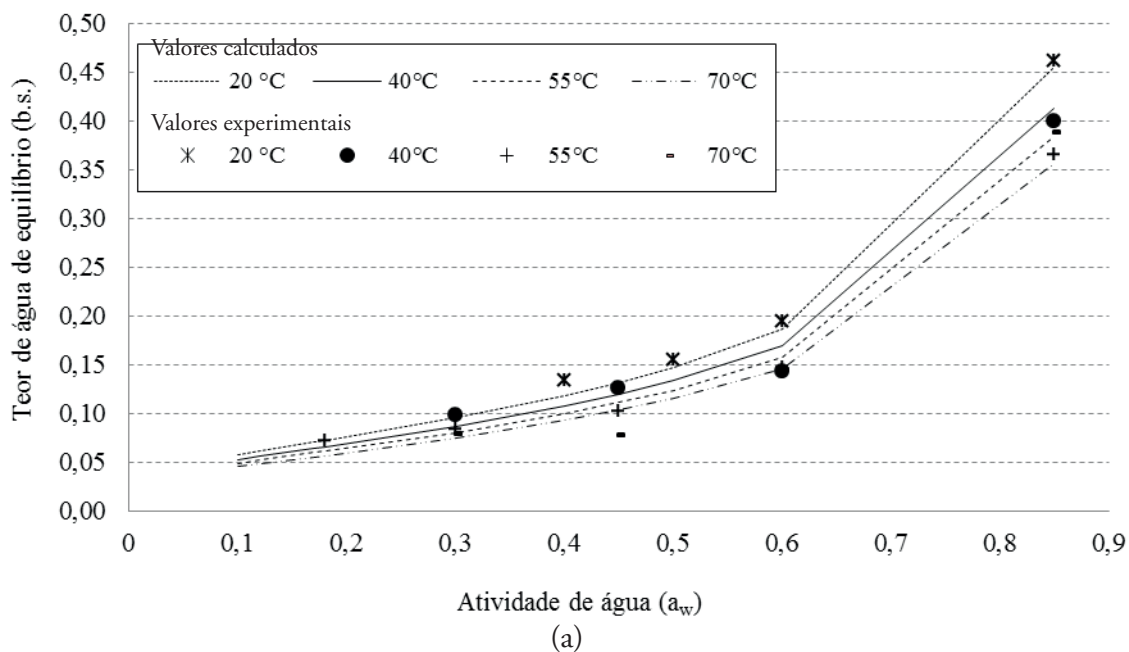


Figura 1. Valores experimentais e estimados pelo Modelo de Halsey Modificado (a) e Gab Modificado (b) do teor de água de equilíbrio em função da atividade de água (a_w) e temperatura

3.2 CALOR ISOSTÉRICO

A partir dos resultados verificados anteriormente e tendo em vista a representatividade dos fenômenos de higroscopicidade, os Modelos de Halsey Modificado e GAB Modificado foram utilizados para a determinação dos valores de ativi-

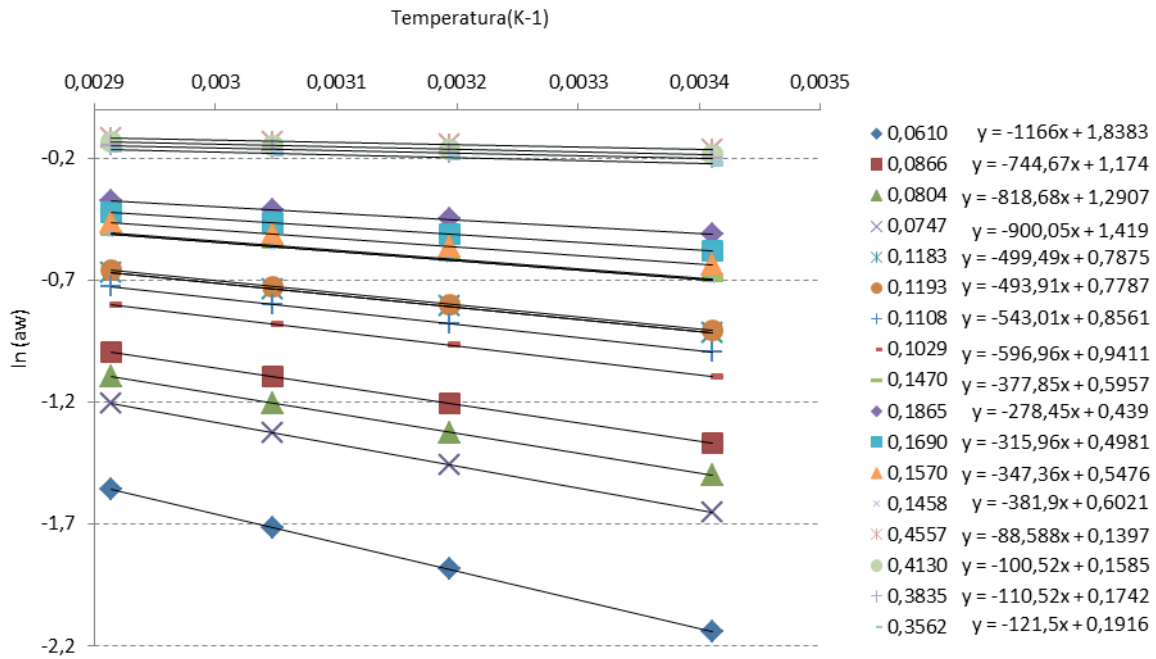
dade de água (a_w), na análise do calor isostérico de sorção da casca e da polpa do abacaxi. Na Tabela 4, estão descritos os valores de $\ln(a_w)$ para a casca e a polpa do abacaxi a partir dos teores de água de equilíbrio obtidos em função, respectivamente, dos Modelos de Halsey Modificado e GAB Modificado.

Tabela 4. Valores de $\ln(a_w)$ estimados pelo Modelo Halsey Modificado e Gab Modificado, em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio

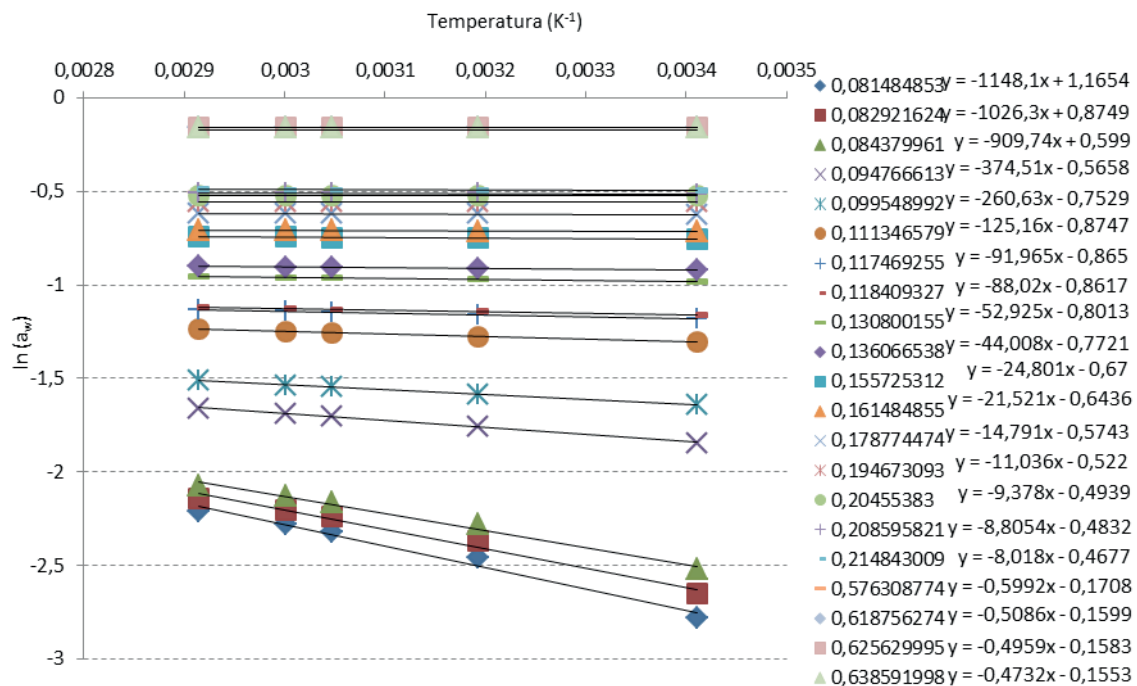
Casca do Abacaxi					Polpa do Abacaxi				
Teor de água de equilíbrio (b.s)	Temperaturas (°C)				Teor de água de equilíbrio (b.s)	Temperaturas (°C)			
	20	40	55	70		20	40	55	70
0,0610	-2,1391	-1,8852	-1,7147	-1,5597	0,0815	-2,7778	-2,4607	-2,3176	-2,2106
0,0747	-1,6512	-1,4552	-1,3236	-1,2039	0,0829	-2,6483	-2,3689	-2,2393	-2,1412
0,0804	-1,5019	-1,3236	-1,2039	-1,0951	0,0844	-2,5225	-2,2790	-2,1624	-2,0729
0,0866	-1,3661	-1,2040	-1,0951	-0,9961	0,0948	-1,8462	-1,7575	-1,7051	-1,6606
0,1029	-1,0951	-0,9651	-0,8779	-0,7985	0,0995	-1,6430	-1,5837	-1,5464	-1,5137
0,1108	-0,9962	-0,8779	-0,7985	-0,7263	0,1113	-1,3015	-1,2745	-1,2562	-1,2392
0,1183	-0,9163	-0,8076	-0,7345	-0,6681	0,1175	-1,1784	-1,1589	-1,1454	-1,1326
0,1193	-0,9061	-0,7985	-0,7263	-0,6607	0,1184	-1,1618	-1,1431	-1,1301	-1,1179
0,1458	-0,7006	-0,6174	-0,5616	-0,5108	0,1308	-0,9816	-0,9706	-0,9628	-0,9553
0,1470	-0,6932	-0,6109	-0,5557	-0,5054	0,1361	-0,9220	-0,9129	-0,9064	-0,9001
0,1570	-0,6372	-0,5616	-0,5108	-0,4646	0,1557	-0,7544	-0,7493	-0,7456	-0,7420
0,1690	-0,5796	-0,5108	-0,4646	-0,4226	0,1615	-0,7169	-0,7125	-0,7093	-0,7061
0,1865	-0,5108	-0,4502	-0,4095	-0,3725	0,1788	-0,6247	-0,6217	-0,6195	-0,6173
0,3562	-0,2229	-0,1964	-0,1787	-0,1625	0,1947	-0,5595	-0,5573	-0,5556	-0,5540
0,3835	-0,2027	-0,1787	-0,1625	-0,1478	0,2046	-0,5258	-0,5239	-0,5225	-0,5211
0,4130	-0,1844	-0,1625	-0,1478	-0,1345	0,2086	-0,5132	-0,5114	-0,5101	-0,5088
0,4557	-0,1625	-0,1432	-0,1303	-0,1185	0,2148	-0,4950	-0,4933	-0,4921	-0,4909
					0,5763	-0,1728	-0,1727	-0,1726	-0,1725
					0,6188	-0,1616	-0,1615	-0,1615	-0,1614
					0,6256	-0,1600	-0,1599	-0,1598	-0,1597
					0,6386	-0,1569	-0,1569	-0,1568	-0,1567

A partir dos valores de $\ln(a_w)$, a seguir, estão representadas as curvas de logaritmo neperiano das atividades de água da casca e da polpa do abacaxi em função do inverso da temperatura

absoluta ($1/T, K^{-1}$) para diferentes teores de água de equilíbrio (b.s.) e suas respectivas equações lineares (Figura 2).



(a)



(b)

Figura 2. Valores de $\ln(a_w)$ para diferentes teores de água de equilíbrio (b.s.) para a casca (a) e para a polpa (b) do abacaxi

Em função das inclinações das retas, calculou-se, através da Eq. 14, os valores do calor isotérmico líquido de sorção (q_{st}) da casca e da polpa do abacaxi. Para a determinação dos valores de calor isotérmico integral de sorção (Q_{st}), em kJ kg^{-1} ,

assim como o representado pela Eq. 17, levou-se também em consideração o valor do calor latente de vaporização da água livre (L), que representa a mínima quantidade de energia necessária para evaporar a água. Para este cálculo levou-se em

conta a temperatura média utilizada no trabalho, que foi de 46,25°C para a casca e 48,57°C para a polpa do abacaxi, o que resultou em um valor de calor latente de vaporização de, respectivamente, 2370,75 e 2386,114 kJ kg⁻¹. Os valores do ca-

lor isostérico líquido e integral de sorção obtidos, respectivamente, da casca e da polpa do abacaxi, a partir da inclinação da reta e do calor latente de vaporização, estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5. Valores do calor isostérico líquido e integral de sorção para diferentes teores de água de equilíbrio (b.s.)

Casca do Abacaxi				Polpa do Abacaxi			
Teor de água de equilíbrio (b.s)	Inclinação da reta	Calor isostérico líquido (kJ kg ⁻¹)	Calor isostérico integral (kJ kg ⁻¹)	Teor de água de equilíbrio (b.s)	Inclinação da reta	Calor isostérico líquido (kJ kg ⁻¹)	Calor isostérico integral (kJ kg ⁻¹)
0,0610	-1166,0	538,5754	2909,3254	0,0815	-1148,00	530,2612	2916,3755
0,0747	-744,6	343,9307	2714,6807	0,0829	-1026,00	473,9094	2860,0237
0,0804	-818,6	378,1113	2748,8613	0,0844	-909,70	420,1904	2806,3047
0,0866	-900,0	415,7100	2786,4600	0,0948	-374,50	172,9815	2559,0958
0,1029	-499,4	230,6729	2601,4229	0,0995	-260,60	120,3711	2506,4854
0,1108	-493,9	228,1324	2598,8824	0,1113	-125,10	57,7837	2443,898
0,1183	-543,0	250,8117	2621,5617	0,1175	-91,96	42,4763	2428,5906
0,1193	-596,9	275,7081	2646,4581	0,1184	-88,02	40,6564	2426,7707
0,1458	-377,8	174,5058	2545,2558	0,1308	-52,92	24,4437	2410,558
0,1470	-278,4	128,5930	2499,3430	0,1361	-44,00	20,3236	2406,4379
0,1570	-315,9	145,9142	2516,6642	0,1557	-24,80	11,4551	2397,5694
0,1690	-347,3	160,4179	2531,1679	0,1615	-21,52	9,9401	2396,0544
0,1865	-381,9	176,3996	2547,1496	0,1788	-14,79	6,8315	2392,9458
0,3562	-88,6	40,9151	2411,6651	0,1947	-11,03	5,09488	2391,209
0,3835	-100,5	46,4210	2417,1710	0,2046	-9,38	4,3317	2390,446
0,4130	-110,5	51,0400	2421,7900	0,2086	-8,81	4,0670	2390,1813
0,4557	-121,5	56,1209	2426,8709	0,2148	-8,02	3,7035	2389,8178
				0,5763	-0,60	0,2767	2386,391
				0,6188	-0,51	0,2346	2386,3489
				0,6256	-0,50	0,2286	2386,3429
				0,6386	-0,47	0,2185	2386,3328

A partir da obtenção desses dados, e utilizando-se o programa STATISTICA 5, chegou-se às equações do calor isostérico integral de sorção da casca e da polpa do abacaxi (Eqs. 18 e 19), em função do teor de água de equilíbrio (b.s.) e das temperaturas médias analisadas.

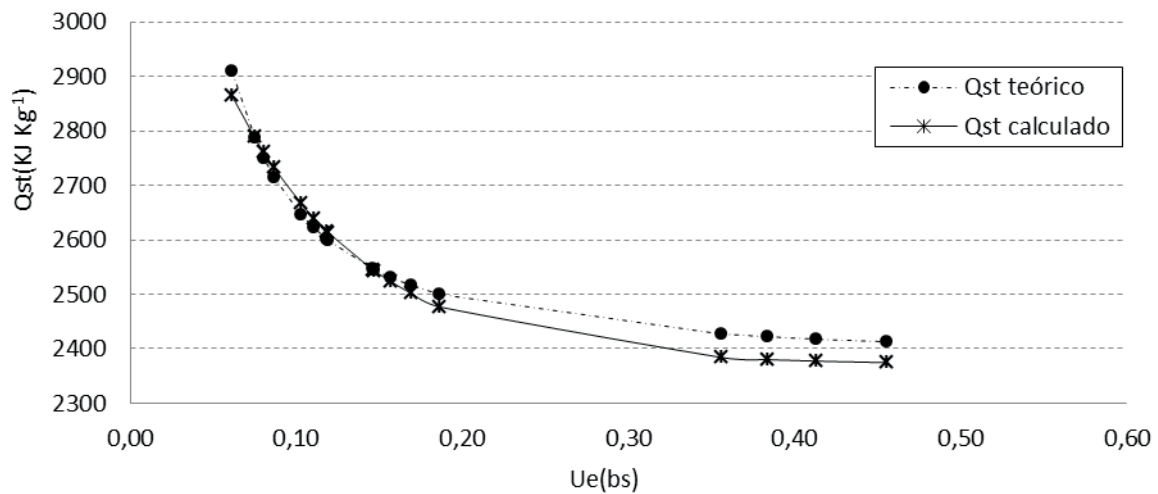
$$Q_{st} = 1047,334 \cdot \exp(-12,28901 \cdot U_e) + 2370,75 \quad (18)$$

$$Q_{st} = 313582,8 \cdot \exp(-78,3834 \cdot U_e) + 2386,114 \quad (19)$$

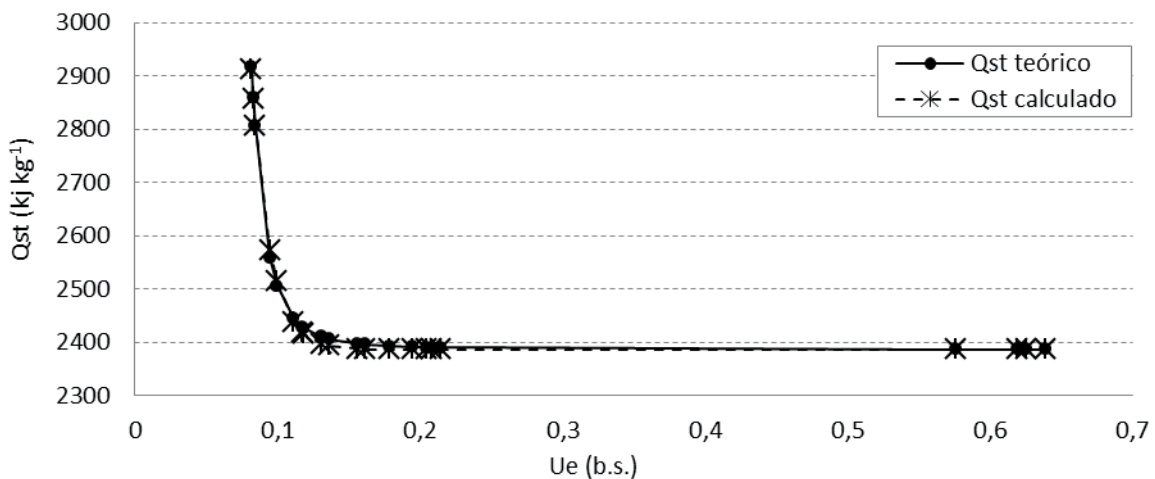
Q_{st} – Calor isostérico integral de sorção, kJ kg^{-1} ; U_e – Teor de água de equilíbrio, base seca em decimal.

Os valores dos parâmetros estimados e coeficiente de determinação da casca e da polpa do abacaxi foram, respectivamente, $A = 1047,334$, $B = 12,28901$, e $R^2 = 0,967$ para a casca, $A = 313582,8$, $B = 78,3834$, e $R^2 = 0,998$ para a polpa.

Assim, a Figura 4 apresenta os valores teóricos e calculados do calor isostérico integral de sorção em função do teor de água de equilíbrio, em b.s.



(a)



(b)

Figura 4. Valores teóricos e calculados do calor isostérico integral de sorção em função do teor de água de equilíbrio para a casca (a) e para a polpa (b) do abacaxi

A partir da análise da Figura 4, assim como o mencionado por Chirife e Iglesias (1978), é possível verificar que à medida que o teor de água do produto diminui, mais energia é necessária fornecer ao mesmo para a remoção de água. Dessa maneira, se verifica que os valores de calor isostérico integral de sorção da casca e da polpa do abacaxi na faixa de teor de água de, respectivamente, 0,0610 a 0,4557 e 0,0815 a 0,6386 (b.s.), variaram de 2411,665 a 2909,325 kJ kg⁻¹ para a casca e 2386,11 a 2913,93 kJ kg⁻¹ para a polpa do abacaxi.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos através desse trabalho foi possível concluir que:

- Os teores de água de equilíbrio da casca e da polpa do abacaxi, analisados separadamente, variam proporcionalmente em função da umidade relativa do ar, para uma mesma temperatura; e decresceram a medida que se aumentou a temperatura, para a mesma umidade relativa do ar. Dessa maneira verifica-se que tanto a casca como a polpa do abacaxi caracterizam-se como produtos higroscópicos.
- A partir da análise dessa dinâmica e baseando-se em parâmetros estatísticos, o Modelo de Halsey Modificado foi o que melhor representou o fenômeno de higroscopicidade da casca do abacaxi, enquanto que para a polpa do abacaxi, o melhor modelo representativo do fenômeno de higroscopicidade foi o modelo de Gab Modificado.
- Já, quanto a análise do calor isostérico integral, foi verificado que para a casca do abacaxi a variação do teor de água de equilíbrio de 0,061 a 0,456 b.s., há a necessidade de uma demanda de energia proporcional a variação de 2411,665 a 2909,325 kJ kg⁻¹, enquanto que para a polpa do abacaxi quando há uma variação de teor de água de equilíbrio de 0,0815 a 0,6386 b.s., há uma necessidade de demanda energética de 2386,11 a 2913,93 kJ kg⁻¹.
- A medida que o teor de água de equilíbrio diminui, se faz necessário fornecer uma maior quantidade de energia para a remoção da água contida no produto.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asae Standards. (1999) Transactions of ASAE, St. Joseph, MI, 980p.
- Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Hall, C. W. (1992) Drying and storage of grains and oilseeds. Westport : AVI, 450 p.
- Chen, C.; Morey, V. (1989a) Comparison of four EMC/ERH equations. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.32, n.3, p.983-990.
- Chen, C.; Morey, V. (1989b) Equilibrium relative humidity (ERH) relationships for yellow-dent corn. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.32, n.3, p.999-1006.
- Chen, C.; Jayas, D.S. (1998) Evaluation of the GAB equation for the isotherms of agricultural products. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.41, n.6, p.1755-1760.
- Chirife, J.; Iglesias, H. A. (1978) Equations for fitting water sorption isotherms of food: Part 1 – a review. J. Food Technol., v. 13, n. 3, p. 159-174, Jun.
- Corrêa, P.C.; Martins, D.S.R.; Melo, E.C. (1995) Umigrãos: Programa para o cálculo do teor de umidade de equilíbrio para os principais produtos agrícolas. Viçosa: Centreinar – UFV, 10p.
- Corrêa, P.C.; Vital, R.B.; Martins, J.H. (1998) Higroscopicidade e entalpia de vaporização para madeira de *Eucalyptus grandis*. Revista Árvore, Viçosa, v.22, n.4, p.555-561.
- Douglas, M.; Donald, G.W. (1988) Non linear regression analysis and its applications. New York: Weley series in probability and mathematical statistics, John Wiley & Sons. 365p.
- Draper, N.R.; Smith, H. (1981) Applied regression analysis. New York: Weley series in probability and mathematical statistics, John Wiley & Sons, 709p.
- Drouzas, A. E.; Schubert, H. (1996) Microwave Application in Vacuum Drying of Fruits. Journal of food Engineering. Great Britain. Volume 28, p. 203 – 209.

- Gouveia, J. P. G.; Almeida, F. de A.C.; Fernandez, F. R.; Murr, F. E. X. M. (1999) Estudo das isotermas de sorção e calor isostérico do gengibre sem casca. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 28, Pelotas, RS. Anais... CD Rom.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: < http://www.ibge.com.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=998&id_pagina=1>, 2007. Acesso em Dezembro de 2010
- Jayas, D.S.; White, N.D.G.; Muir, W.E. (1995) Stored-Grain Ecosystems. New York: MARCEL DEKKER, INC., 757p.
- Lomauro, C.J.; Bakshi, A.S.; Labuza, T.P. (1985) Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, Vegetable and meat products. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, Zurich, v.18, n.2, p.111-117.
- Mazza, G.; Jayas, D.S. (1991) Equilibrium moisture characteristics of sunflower seeds, hulls, and kernels. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.34, n.2, p.534-538.
- Mohapatra, D.; Rao, P.S. (2005) A thin layer drying model of parboiled wheat. Journal of Food Engineering. p.513-518.
- Morey, V.; Wilcke, W.F.; Meronuck, R.A. *et al.* (1995) Relationship between equilibrium relative humidity and deterioration of shelled corn. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.38, n.4, p.1139-1145.
- Pereira, J.A.M.; Queiroz, D.M. (1987) Higroscopia, Viçosa: CENTREINAR, 28p.
- Pfost, H.B.; Maurer, S.G.; Chung, D.S. *et al.* (1976) Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. ASAE, Paper No. 76-3520, St. Joseph, 11p.
- Sauer, D.B. (1995) Storage of Cereal Grains and Their Products. Fourth Edition. Ed. American Association of Cereal, Inc. 1992, p. 615.
- Silva M. M.; Gouveia, J.P.G.; Almeida, F. de A.C.. (2002) Dessorção e calor isostérico em polpa de manga. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.1, p.123-127.
- Sokhansanj, S.; Zhijie, W.; Jayas, D.S. *et al.* (1986) Equilibrium relative humidity- moisture content of rapessed (canola) from 5°C to 25°C. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.29, n.3, p.837-839.
- Sokhansanj, S.; Yang, W. (1996) Revision of the ASAE standard D245.4: moisture relationships of grains. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.39, n.2, p.639-642.
- Wang, N.; Brennan, J.G. (1991) Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. Journal of Food Engineering, v.14, n.1.