Isotermas e propriedades termodinâmicas de sorção de água da farinha de mazamorra de quina com cal

Isothermes and thermodynamic properties of water sorption of mazamorra de quina flour with lime

DOI:10.34117/bjdv6n11-230

Recebimento dos originais: 03/10/2020
Aceitação para publicação: 12/11/2020

Maria Luiza Morais Pontes
Grau de formação: Graduanda em Engenahria Química
Instituição: Universidade Federal do Maranhão
Endereço: Av. dos Portugueses, 1966 - Vila Bacanga, São Luís - MA, 65080-805
E-mail: marialupontes9@gmail.com

Julles Mitoura dos Santos Junior
Grau de formação: Mestrando em Engeharia Química
Instituição: Universidade Estadual de Campinas
Endereço: Cidade Universitária Zeferino Vaz - Barão Geraldo, Campinas - SP, 13083-970
E-mail: jullesmitoura7@gmail.com

RESUMO

A farinha de mazamorra de quinoa (*Chenopodium quinoa Wild*) com cal embora seja um produto de baixa umidade apresenta água interna provinda do cereal em questão. O comportamento higroscópico desse produto pode, portanto, ser estudado por meio das isotermas de sorção. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi analisar diferentes modelos matemáticos para reprodução de tais isotermas bem como o calor isostérico de sorção do produto. Para isso, foram feitos ajustes de dados utilizando o *software Excel* para os parâmetros dos modelos de Oswin, Henderson, GAB e BET nas temperaturas de 30, 45 e 60°C e atividades de água na faixa de 0,000 até 0,769. O modelo que melhor ajustou os dados foi o proposto por GAB, apresentando valores próximos de 1 para o R^2, desvios médios relativos inferiores a 10% e erros médios relativos próximos de 0, representando uma isoterma do tipo II. Ademais disso, percebeu-se que a adsorção de água é menor para maiores temperaturas e que o calor isostérico de sorção apresentou um comportamento decadente à medida que a umidade de equilíbrio aumentava.

Palavras-chave: farinha de mazamorra de quinoa com cal, isoterma de sorção, calor isostérico de sorção, modelo de GAB.

ABSTRACT

Quinoa mazamorra flour (*Chenopodium quinoa Wild*) with lime, although it is a low humidity product, has internal water from the cereal in question. The hygroscopic behavior of this product can therefore be studied using sorption isotherms. Thus, the objective of the present work was to analyze different mathematical models for reproducing such isotherms as well as the isosteric heat of sorption of the product. For this, data adjustments were made using the Excel software for the parameters of the Oswin, Henderson, GAB and BET models at temperatures of 30, 45 and 60 ° C and water activities in the range of 0.000 to 0.769. The model that best fitted the data was the one proposed by GAB, with values close to 1 for R2, relative average deviations below 10% and relative average errors close to 0,

representing a type II isotherm. Furthermore, it was noticed that the adsorption of water is lower for higher temperatures and that the isosteric heat of sorption showed a decadent behavior as the equilibrium humidity increased.

Keywords: quinoa mazamorra flour with lime, sorption isotherm, isosteric sorption heat, GAB model.

1 INTRODUÇÃO

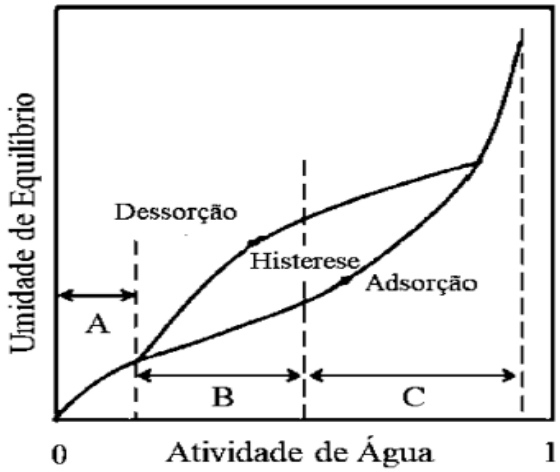
A quinoa, “Chenopodium quinoa Willd.", encontra-se na região andina há mais de 7000 anos e devido ao seu elevado teor nutricional recebe o apelido de “grão de ouro dos Andes”. Cultivada e preservada inicialmente pelos pré-colombianos, a mesma constituía-se como um importante alimento para subsistência desses povos, responsáveis, também, pelo seu reconhecimento ao redor do mundo, uma vez que ela se adapta a diversos climas e solos (Salcedo and Santibáñez, 2014).

A mazamorra de quinoa com cal, por sua vez, é um produto rico em proteínas e aminoácidos essenciais, resultado da vaporização, seleção, pré-cozimento e moagem do cereal em questão; e sua farinha, embora tenha uma baixa proporção de umidade, apresenta água interna provinda dessa semente (Mitoura *et al.*, 2019). Sendo assim, é necessário um estudo acerca da influência da água nos alimentos posto que ela tem ação direta na modificação dos mesmos, estando presente na forma livre ou ligada ao material orgânico. A atividade de água, portanto, é um indicador da intensidade de ligação dos componentes sólidos com as moléculas de água e da quantidade desse líquido para uso bacteriano e de outros agentes degradantes (Gava *et al.*, 2009).

Seguindo essa lógica, é possível notar que em um local fechado a atividade de água de um alimento posto nesse ambiente e a umidade relativa do ar estão relacionadas, sendo que essa última exerce influência na quantidade de água integrada por esse alimento. As isotermas de sorção reproduzem graficamente essa relação e o estudo das mesmas auxilia na predição do tempo de secagem, determinação do tipo de embalagem, caracterização e vida útil do produto. De forma explicativa, elas são curvas que retratam o comportamento da atividade de água de um componente quando ele perde (dessorção) e/ou ganha (adsorção) umidade a uma temperatura contínua (De Oliveira *et al.*, 2014).

Dessa maneira, as isotermas podem ser analisadas através da compreensão de suas regiões, assim como é demonstrado na Figura 1. A região A representa a água ligada aos compostos polares e hidrofílicos do produto, além de não se encontrar à disposição para reações químicas. Na região B, a água não se apresenta tão ligada ao material como ocorre na primeira região e é tida como a passagem da água ligada aos compostos orgânicos para a água livre, encontrada na região C. Esta, por sua vez, está nos espaços entre os compostos ou ligada a eles suavemente (Lemus M, 2011).

Figura 1 – Isoterma de sorção de um produto alimentício típico.



Fonte: LEMMUS, 2011

Com base no que foi citado, é de suma importância adicionar ao estudo das isotermas a análise das faculdades termodinâmicas da água, dado que elas são um caminho importante para a compreensão das interações das moléculas de água com o material considerado (Villa-Vélez *et al.*, 2012). Sendo assim, é feito um estudo sobre a modelagem matemática das isotermas de sorção através de diferentes modelos presentes na literatura, tanto empíricos quanto teóricos.

À vista disso, o presente trabalho tem o propósito de analisar o desempenho higroscópico da farinha de mazamorra de quinoa com cal por meio de isotermas de adsorção conseguidas através do ajuste dos modelos de *GAB* (Gugghenheim-Anderson-De Boer), *BET* (Brunauer-Emmett-Teller), Oswin e Henderson (Timmermann *et al.*, 2001; Rizvi, 2005). Ademais, foi determinado o calor isostérico de sorção de água da matéria-prima e o comportamento desta propriedade termodinâmica foi debatido.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATÉRIA PRIMA

A farinha de Mazamorra de quina com cal foi adquirida em um mercado local na cidade de Juliaca, Perú. O produto foi conservado em temperatura e umidade relativa controlada para posterior uso experimental. O experimento foi realizado nas dependências do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Engenharia Química na Universidade Federal do Maranhão, campus Don Delgado.

2.2 ISOTERMAS DE SORÇÃO

As isotermas de adsorção da farinha de Mazamorra de quinoa com cal foram estudadas através do método estático gravimétrico, utilizando-se soluções de ácido sulfúrico (H_2SO_4) nas concentrações

de 30%, 40%, 50%, 60% e 70% assim apresenta Labuza et al. (1985) . Dessa forma, foram criados microssistemas com atividades de água (a_w) que variaram de 0,000 até 0,769 na faixa de temperaturas de 30 a 60ºC (Labuza *et al.*, 1985; Rizvi, 2005). Assim, aproximadamente 1,0 g de amostra foi pesado em um copo de plástico previamente tarado e posicionado sobre um suporte no interior do frasco de vidro hermético, contendo em seu fundo uma das soluções de H_2SO_4. O mesmo processo foi repetido para todas as soluções de ácido sulfúrico, colocando-se em cada frasco um total de três amostras, sendo posteriormente armazenados em uma incubadora B.O.D. (modelo SP-500, SPLabor, Brasil) às temperaturas de 30, 45 e 60ºC. As amostras, por sua vez, foram mantidas nestas circunstâncias até atingirem um equilíbrio higroscópico, ou seja, até as condições do ambiente e as amostras ficarem estáveis de forma que o material deixe de sofrer variações quanto ao seu conteúdo mássico; logo é possível obter valores de equilíbrio do material em função das condições do ambiente. Ademais, o conteúdo de umidade inicial do material foi determinado em estufa a 105ºC por 24 horas segundo o método AOAC 934.06 (Aoac, 2007).

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA E VALIDAÇÃO ESTATISTICA

A Tabela 1 apresenta os modelos teóricos (*GAB* e *BET*) e empíricos (*Oswin* e *Henderson*) utilizados para os ajustes da isotermas de adsorção.

Tabela 1 – Modelos de ajuste de isotermas de sorção.

Modelo	Equação	
Oswin	$X_e = a\left(\frac{a_w}{1-a_w}\right)^b$	(1)
Henderson	$X_e = \left(\frac{-a}{\ln a_w}\right)^{\frac{1}{b}}$	(2)
GAB	$X_e = \frac{X_m C K a_w}{(1-Ka_w)\left[1+(C-1)Ka_w\right]}$	(3)
BET	$X_e = \frac{X_m C a_w}{(1-a_w)\left[1+(C-1)a_w\right]}$	(4)

Na validação estatística da modelagem e simulação foi empregado o coeficiente de determinação (R^2) Eq. (5), a raiz quadrática do erro médio relativo (*RMSE*) (Eq. 6) e o desvio médio relativo (*P*) Eq. (7). O R^2 determina a eficiência dos modelos propostos frente à variação dos dados, já o parâmetro estatístico *RMSE* é um critério que avalia a precisão das estimativas (Sablani *et al.*, 2002).

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^{\beta}(y_k^* - \bar{y})^2}{\sum_{k=1}^{\beta}(y_k - \bar{y})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(y_k - y_k^*\right)^2} \quad (6)$$

$$P(\%) = \frac{100}{n}\sum_{k=1}^{\beta}\frac{\left|y_k - y_k^*\right|}{y_k} \quad (7)$$

De forma geral, é considerado que valores de desvio relativo médio abaixo de 10% indicam um razoável ajuste para os dados (Aguerre et al., 1986).

2.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Na condição de equilíbrio termodinâmico, algumas observações necessitam ser feitas de modo a capturar melhor o fenômeno e sua manifestação nas isotermas. Sendo assim, considerando uma condição estática nas propriedades macroscópicas do sistema, há equilíbrio quando a fração vaporizada de soluto e sua fração condensada, por unidade de tempo, são iguais. Em termos de variáveis físicas, espera-se que a temperatura, a pressão e o potencial químico, no vapor e no alimento, sejam uniformes.

$$\mu_{vapor}^0 + RTlnf_w = \mu_{alimento}^0 + RTlna_w \quad (8)$$

$$\mu_{alimento}^0 = \mu_{vapor}^0 + RTlnf^0 \quad (9)$$

As relações matemáticas anteriores (Eq. 8 e 9) apresentam a condição de equilíbrio termodinâmico para o vapor e o líquido, respectivamente. Assim, ao substituir a Equação 8 na Equação 9, pode-se obter a atividade de água (Eq. 10) como sendo a razão da fugacidade do vapor pela fugacidade da água pura, à mesma temperatura.

$$a_w = \left(\frac{f_w}{f^0}\right)_T \quad (10)$$

A variação da energia livre de Gibbs, no que lhe concerne, pode ser interpretada como indicativo da afinidade dos sorventes pela água, indicando o quanto esse fenômeno é espontâneo ($\Delta G<0$) ou não espontâneo ($\Delta G>0$). As variações na entropia podem estar associadas às forças de ligação ou repulsão no sistema (Villa-Vélez et al., 2012). Portanto, a variação da entropia molar diferencial com o calor

liquido de sorção e a energia livre de Gibbs do sistema a uma determinada temperatura pode ser representada pela equação de Gibbs-Helmholtz:

$$\Delta S = \frac{q_S - \Delta G}{T} \tag{11}$$

Ainda, a energia livre de Gibbs pode ser obtida pela relação abaixo:

$$\Delta G = RT \ln a_w \tag{12}$$

A substituição da Equação 12 na Equação 11 permite a sua linearização, de modo a obter:

$$\ln a_w = \frac{q_S}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \tag{13}$$

Consequentemente, a Equação 13 apresenta uma relação linear entre a atividade de água, o calor líquido de sorção e a entropia molar diferencial, tornando possível obter estas propriedades termodinâmicas através de uma regressão linear de dados por meio das atividades de água e das temperaturas.

Já o calor líquido de sorção pode ser adquirido através da equação de Clausius-Clapeyron utilizando dados obtidos experimentalmente relacionando a umidade de equilíbrio do material com a atividade de água do meio a uma dada temperatura.

$$\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial(1/T)} = -\frac{q_S}{R} \tag{14}$$

O calor isotérico é a soma do calor líquido de sorção com a energia de vaporização da água pura (λ).

$$Q_S = q_S + \lambda \tag{15}$$

Então, o calor isotérico de sorção de um material é considerado como um indicativo das forças de atração intermolecular entre os sítios de sorção e a partículas de água. Assim, para determinação do

calor isostérico integral de sorção (Q_S) é necessário buscar alguma relação do calor latente de vaporização da água pura em função da temperatura; este, por sua vez, está relacionado com a temperatura média para a faixa estudada através da Equação 16.

$$\lambda = 2502,2 - 2,39\overline{T} \quad (16)$$

Ele corresponde à quantidade de energia necessária para mudar a unidade de massa da fase líquida para a fase vapor a uma determinada temperatura. Portanto, a Equação 16 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Q_S = q_S + 2502,2 - 2,39\overline{T} \quad (17)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ISOTERMAS DE SORÇÃO

Para a análise dos modelos matemáticos outrora mencionados, utilizou-se previamente os dados experimentais obtidos para a umidade de equilíbrio nas três temperaturas estudadas, os quais estão presentes na Tabela 2.

Para a definição de tais temperaturas, foi estabelecido uma faixa desde a condição ambiente até uma temperatura elevada limite para um alimento sem que ele perca suas características físico-químicas, cor e sabor. Sendo assim, fez-se uma análise dos modelos, individualmente, ajustando-os com recursos do *software Excel* de forma a se obter o menor erro relativo médio através de uma relação entre os dados experimentais e os dados obtidos. Dessa forma, a Tabela 3 apresenta os parâmetros de ajuste dos modelos utilizados. A respeito das informações contidas na Tabela 2, pode-se afirmar que os modelos estudados ajustaram de forma satisfatória os dados experimentais com o valor médio para o coeficiente de determinação. Entretanto, o modelo proposto por Guggenheim-Anderson-De Boer (*GAB*) descreveu com maior precisão as isotermas de equilíbrio nas condições analisadas, uma vez que resultou em valores próximos de 1 para o R^2, desvios médios relativos (*P*) inferiores a 10% e erros médios relativos (*RMSE*) próximos de 0.

Tabela 2 – Umidade de equilíbrio de adsorção da farinha de Mazamorra de quinoa com cal obtida experimentalmente.

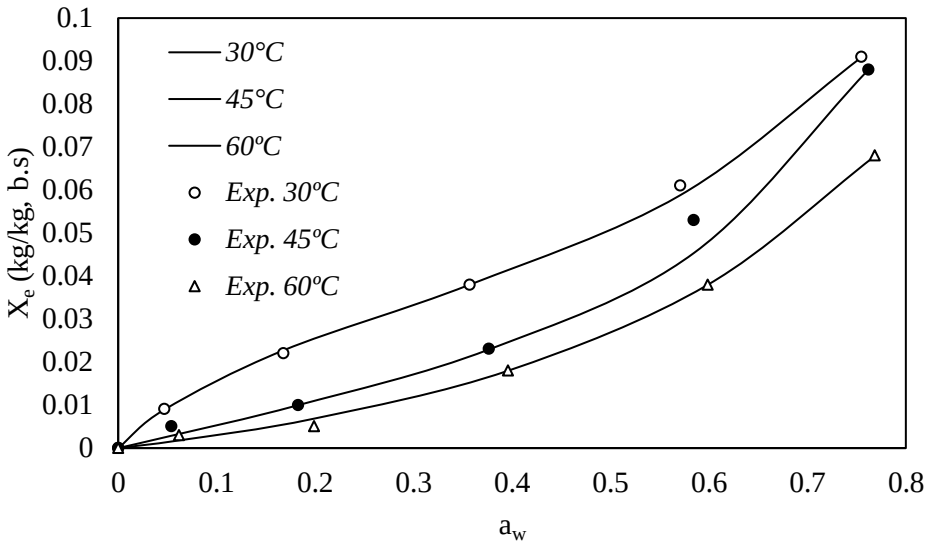
T=30°C		T=45°C		T=60°C	
a_w	X_e (kg/kg, b.s)	a_w	X_e (kg/kg, b.s)	a_w	X_e (kg/kg, b.s)
0,755	0,091	0,762	0,088	0,769	0,068
0,571	0,061	0,585	0,053	0,599	0,038
0,357	0,038	0,377	0,023	0,396	0,018
0,168	0,022	0,183	0,01	0,199	0,005
0,047	0,009	0,054	0,005	0,062	0,003
0	0	0	0	0	0

Tabela 3 – Parâmetros de ajuste para as isotermas de adsorção da farinha de Mazamorra de quinoa com cal para diferentes modelos matemáticos.

		Temperatura		
Modelo	Parâmetro	30°C	45°C	60ºC
Oswin	*a*	0,052	0,035	0,025
	b	0,554	0,784	0,818
	R^2	0,999	0,997	0,998
	P(%)	3,248	8,480	13,004
	RMSE	0,003	0,003	0,002
Henderson	*a*	0,027	0,036	0,035
	b	1,087	0,840	0,753
	R^2	0,985	0,987	0,987
	P(%)	13,585	7,841	13,085
	RMSE	0,010	0,006	0,004
GAB	*Xm*	0,033	0,027	0,188
	C	8,157	2,015	0,221
	K	0,867	0,967	0,651
	R^2	1,000	0,996	0,999
	P(%)	1,248	9,500	12,864
	RMSE	0,001	0,003	0,001
BET	*Xm*	0,028	0,024	0,018
	C	8,784	2,519	2,450
	R^2	0,991	0,995	0,997
	P(%)	4,558	9,774	14,735
	RMSE	0,008	0,004	0,002

Analisando a Tabela 3 é possível observar que os valores dos parâmetros *C* e *K* tendem a ser maior que 2 e menor que 1, respectivamente, com o aumento da temperatura de 30 para 45°C, classificando, portanto, as isotermas como do tipo II como afirma Blahovec (2004) assim como demonstra a Figura 2.

Figura 2 – Isoterma de adsorção da farinha de Mazamorra de quinoa com cal para o modelo de GAB.



Analisando a Figura 2, pode-se inferir que as isotermas apresentam comportamento sigmoidal, característico do tipo II, conforme a classificação de Brunauer et al. (1940); mais comum em alimentos segundo Medeiros et al. (2006). Examinando-a, é importante atentar-se ao fato de que o aumento da atividade de água acarreta em acréscimos na umidade de equilíbrio e esta, por sua vez, diminui à medida que a temperatura cresce. Tal conduta é determinada pelo aumento da pressão de vapor de água no ar e na superfície do alimento, sendo maior nesta última, posto que exibe um número elevado de moléculas de água em relação ao ar, provocando perdas significativas do conteúdo de umidade para que se possa atingir o equilíbrio (Ferreira *et al.*, 2003). A causa desse fator também pode ser atribuída à diminuição do número total de sítios ativos à disposição para ligação com a molécula de água devido a mudanças de natureza física e/ou químicas (Goula *et al.*, 2008).

3.2 PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Tendo em vista que o modelo de GAB apresenta certa complexidade quando comparado aos demais e melhor coeficiente de correlação com os dados experimentais (Tabela 2), é necessário expressar a atividade de água em função dos parâmetros de determinação do modelo. Assim sendo, a Eq. (18) apresenta uma forma alternativa para a descrição do mesmo.

$$(C-1)K^2a_w{}^2+\left[2-C\left(1-\frac{X_m}{X_e}\right)\right]Ka_w-1=0 \qquad (18)$$

Para melhor desenvolvimento algébrico, os parâmetros α (Eq. 19) e β (Eq. 20) serão criados para eventuais substituições na Eq. (18).

$$\alpha = (C-1)K^2 \tag{19}$$

$$\beta = \left[2 - C\left(1 - \frac{X_m}{X_e}\right)\right]K \tag{20}$$

A Equação 18 pode ser reescrita conforme a Equação 21. Esta, por sua vez, é um polinômio de segundo grau, logo, apresenta duas possíveis soluções para cada condição de umidade de equilíbrio.

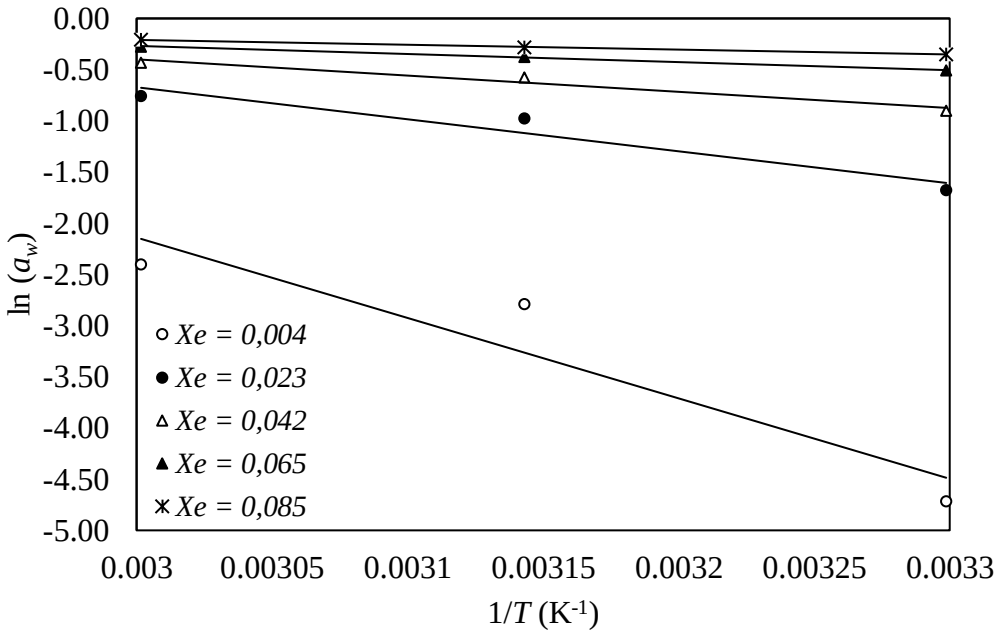
$$\alpha a_w^{\,2} + \beta a_w - 1 = 0 \tag{21}$$

Para a determinação da atividade de água, será utilizada somente a raiz positiva do polinômio (Villa-Vélez et al., 2012) (Eq. 22).

$$a_w = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 + 4\alpha}}{2\alpha} \tag{22}$$

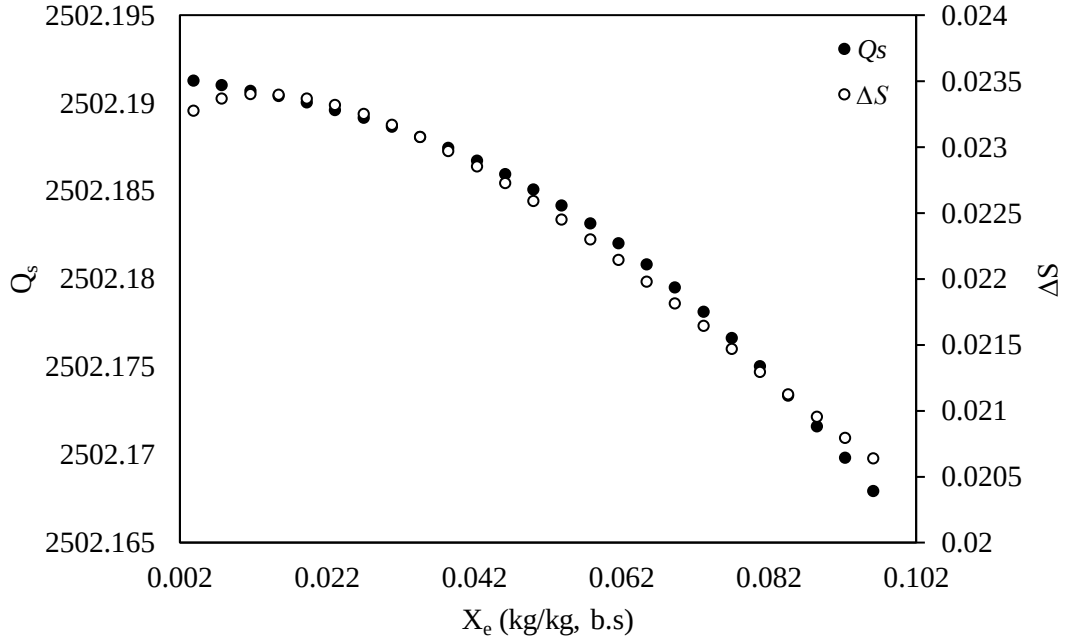
As propriedades termodinâmicas obtidas das isotermas de sorção fornecem informações sobre a forma como o alimento interage com as partículas de água na superfície e no seu interior. O conhecimento destas isotermas em diferentes temperaturas permite avaliar o calor de sorção, propriedade que determina a interação entre adsorvente e adsorbato (Villa-Vélez *et al.*, 2012). A Figura 3 apresenta as sucessivas regressões lineares para obtenção do calor líquido de sorção para os valores iniciais de umidade de equilíbrio. Para os demais resultados utilizou-se a mesma metodologia. Apresenta-se, ainda, o logaritmo natural da atividade de água variando com o inverso da temperatura, resultados necessários para aplicar a Eq. (13), na qual os coeficientes angulares e lineares de cada reta relacionam-se com o calor líquido de sorção e a entropia molar diferencial, respectivamente.

Figura 3 – Logaritmo natural da atividade de água em função do inverso da temperatura.



Na Figura 4 encontra-se representado o calor isostérico e entropia diferencial molar de sorção em função da umidade do material.

Figura 4 – Calor isostérico e entropia de sorção de água da farinha de Mazamorra de quinoa com cal.



Os resultados mostraram que o calor isostérico de sorção tende a diminuir à medida em que a umidade do material aumenta, devido a redução da interação das moléculas de água com as demais moléculas do sistema (Kaya and Kahyaoglu, 2006). Os maiores valores de calor de sorção indicam uma maior afinidade entre as moléculas de água e à superfície ativa do alimento. Inicialmente o

fenômeno de sorção ocorre nos sítios ativos disponíveis, estes, então, passam a ser ocupados e a sorção tende a ocorrer nos sítios menos ativos, que correspondem aos menores valores de calores isostérico de sorção (Medeiros *et al.*, 2006). A Figura 4 apresenta também a entropia molar diferencial em função da umidade de equilíbrio. De forma semelhante ao calor de sorção, a entropia diferencial se apresenta como função inversa da umidade, onde a mesma cresce exponencialmente com o decréscimo da umidade do produto.

Levando em conta que a entropia revela o grau de desordem de um sistema termodinâmico, a entropia molar diferencial do abiu varia com a quantidade de água que o mesmo perde, esta grandeza varia com a pressão de vapor de água na dessorção de água.

A entropia diferencial de um alimento relaciona-se diretamente com a quantidade de sítios ativos disponíveis em um determinado nível energético (Al-Muhtaseb et al., 2004).

A medida em que o produto retém água, os sítios ativos do mesmo tendem a saturar-se, sendo ocupados pelas moléculas de água, restando menos sítios ativos livres, por isso as entropias associadas aos sítios ainda livres tornem-se cada vez menores. Para baixos valores de umidade, as moléculas de água perdem movimento rotacional devido a saturação dos sítios ativos, e por esse motivo a entropia diferencial apresenta comportamento decrescente com o aumento da umidade.

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, o modelo de GAB apresentou melhor ajuste para os dados experimentais das isotermas de adsorção nas temperaturas de 30, 45 e 60°C. Utilizando os parâmetros desse modelo, foi possível determinar o calor isostérico de sorção de água da farinha de mazamorra de quinoa com cal.

A justificativa para o decréscimo acentuado no calor isostérico de sorção com o aumento da umidade de equilíbrio, é que as ligações de hidrogênio apresentam variação à medida em que água é adsorvida. Esta propriedade apresenta maiores índices à baixas umidades, o que indica maior energia de ligação para a remoção de água do produto, por este motivo à medida que a umidade do material aumenta, o calor isostérico de sorção tende a diminuir pois este fenômeno ocorre nos sítios ativos disponíveis que passam a ser ocupados e a sorção tende a ocorrer nos sítios menos ativos, estes correspondem aos menores valores energia de ligação.

Além disso, verifica-se que o aumento da temperatura provoca redução na umidade de equilíbrio, dessa forma, nota-se que a umidade de equilíbrio para a farinha de mazamorra de quinoa com cal é diretamente proporcional à atividade de água do meio e inversamente proporcional à temperatura.

5 NOMENCLATURA

X_e - umidade de equilíbrio em base seca (kg/kg, b.s).

a_w - atividade de água.

X_m - umidade de equilíbrio na monocamada.

C - constante de BET.

C, K - constantes de adsorção relacionadas às interações energéticas entre moléculas da monocamada e moléculas próximas dos sítios ativos.

a, b - constantes dos modelos empíricos que dependem da temperatura e da natureza do produto.

λ - calor latente de vaporização da água pura (kJ/mol).

α, β - parâmetros de correlação equação de segundo grau proveniente do modelo de GAB (adimensional).

q_s - *calor líquido de sorção (kJ/kg).*

Q_s - *calor isostérico de sorção (kJ/kg).*

ΔS - *entropia molar diferencial (kJ/mol K).*

ΔG - *energia livre de Gibbs (kJ/mol).*

R - *constante universal dos gases (kJ/ mol K).*

$RMSE$ - *raiz quadrática do erro médio relativo.*

Y^* - *dados de umidade de equilíbrio predita pelos modelos.*

Y - *dados de umidade de equilíbrio experimental.*

$\overline{Y}$ - *dados de umidade de equilíbrio média.*

μ^o - *potencial químico da substância pura.*

f_w - *fugacidade do vapor.*

f^o - *fugacidade da água pura.*

REFERÊNCIAS

AGUERRE, R.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena: Application to the prediction of the effect of temperature on food isotherms. **Journal of Food Science,** v. 51, n. 6, p. 1547-1549, 1986. ISSN 0022-1147.

AOAC. **Official methods of analysis** Gaithersburg: AOAC International 2007.

BLAHOVEC, J. J. J. O. F. E. Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. v. 65, n. 4, p. 489-495, 2004. ISSN 0260-8774.

BRUNAUER, S. et al. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. v. 62, n. 7, p. 1723-1732, 1940. ISSN 0002-7863.

DE OLIVEIRA, D. E. C. et al. Obtenção e modelagem das isotermas de dessorção e do calor isostérico para sementes de arroz em casca. v. 42, n. 3, p. 203-210, 2014. ISSN 1984-5529.

FERREIRA, C. D.; PENA, R. S. J. F. S.; TECHNOLOGY. Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (Bactris gasipaes). v. 23, n. 2, p. 251-255, 2003. ISSN 0101-2061.

GAVA, A. J.; DA SILVA, C. A. B.; FRIAS, J. R. G. **Tecnologia de alimentos**. NBL Editora, 2009. ISBN 8521313829.

GOULA, A. M. et al. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. v. 85, n. 1, p. 73-83, 2008. ISSN 0260-8774.

KAYA, S.; KAHYAOGLU, T. Influence of dehulling and roasting process on the thermodynamics of moisture adsorption in sesame seed. **Journal of Food Engineering,** v. 76, n. 2, p. 139-147, 2006. ISSN 0260-8774.

LABUZA, T. P.; KAANANE, A.; CHEN, J. Y. Effect of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods. **Journal of Food Science,** v. 50, n. 2, p. 385-392, 1985. ISSN 1750-3841. Available at: < http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13409.x >.

LEMUS M, R. Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. **Vitae,** v. 18, n. 3, p. 325-334, 2011. ISSN 0121-4004.

MEDEIROS, M. L. et al. Sorption isotherms of cocoa and cupuassu products. **Journal of Food Engineering,** v. 73, n. 4, p. 402-406, 2006. ISSN 0260-8774.

MITOURA, J. et al. ENTALPIA E ENTROPIA DE SORÇÃO DE ÁGUA DA FARINHA DE CAÑIHUA (Chenopodium pallidicaule Aellen). p. 1-388–416, 2019 2019.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A. e RIZVI, S. S. H. (Ed.). **Engineering Properties of Foods**. 3. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. chap. 7, p.259-346.

SABLANI, S. S.; BAIK, O.-D.; MARCOTTE, M. Neural networks for predicting thermal conductivity of bakery products. **Journal of Food Engineering,** v. 52, n. 3, p. 299-304, 2002/05/01/ 2002. ISSN 0260-8774. Available at: < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877401001194 >.

SALCEDO, S.; SANTIBÁÑEZ, T. Recetario internacional de la quinua: tradición y vanguardia. **FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)**, 2014.

TIMMERMANN, E. O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Water sorption isotherrms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? **Journal of Food Engineering,** v. 48, p. 19-31, 2001.

VILLA-VÉLEZ, H. A. et al. Modelling thermodynamic properties of banana waste by analytical derivation of desorption isotherms. **International Journal of Food Engineering,** v. 8, n. 1, p. 1-19, 2012. ISSN 1556-3758.