

# ISOTERMAS DE ADSORCIÓN EN HARINA DE MAÍZ (*Zea mays* L.)<sup>1</sup>

Antonio Vega GÁLVEZ<sup>2,\*</sup>, Elena Lara ARAVENA<sup>2</sup>, Roberto Lemus MONDACA<sup>2</sup>

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar las isotermas de adsorción de humedad de harina de maíz a tres temperaturas (7, 22 y 45 °C) para el rango de  $a_w$  entre 0,10 y 0,95. Las isotermas se modelaron utilizando siete ecuaciones comúnmente aplicadas en alimentos. La calidad de ajuste se evaluó con el coeficiente de regresión ( $r^2$ ) y el porcentaje de error medio relativo (% E), en función de los cuales se observó que los modelos propuestos por GAB, Oswin y Halsey ajustaron de mejor manera los datos experimentales. La humedad de la monocapa ( $X_m$ ) y la humedad de seguridad ( $X_s$ ) presentaron dependencia con la temperatura con valores de  $E_a$  de 13,6 y 3,3 kJ/mol, respectivamente. Se calculó el calor isostérico de adsorción ( $Q_s$ ) usando la ecuación de Clausius-Clapeyron, obteniéndose un máximo de 21 kJ/mol, para una humedad de 0,075 g agua/g m.s., este parámetro se modeló utilizando la ecuación propuesta por Tsami.

**Palabras-clave:** harina de maíz, isotermas de adsorción, Arrhenius, calor isostérico.

## RESUMO

ISOTERMAS DE ADSORÇÃO EM FARINHA DE MILHO (*Zea mays* L.). O objetivo deste trabalho foi determinar as isotermas de adsorção de umidade da farinha de milho a três temperaturas (7, 22 e 45 °C) para um rango de  $a_w$  entre 0,10 e 0,95. As isotermas foram modelizadas por meio de sete equações normalmente utilizadas em alimentos. A qualidade do ajuste foi avaliada mediante o coeficiente de regressão ( $r^2$ ) e a porcentagem de erro médio relativo (% E), em função dos quais se observou que os modelos propostos por GAB, Oswin e Halsey apresentaram um melhor ajuste dos dados experimentais. A umidade da monocapa ( $X_m$ ) e a umidade de segurança ( $X_s$ ) mostraram dependência da temperatura com valores de  $E_a$  de 13,6 e 3,3 kJ/mol, respectivamente. Calculou-se o calor isostérico de adsorção ( $Q_s$ ) utilizando-se a equação de Clausius-Clapeyron, obtendo-se um máximo de 21 kJ/mol. Para uma umidade de 0,075 g água/g m.s., este parâmetro modelizou-se utilizando a equação proposta por Tsami.

**Palavras-chave:** milho, modelos, Arrhenius, calor isostérico.

## 1 - INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es un cereal ampliamente utilizado en el mundo entero tanto para consumo humano como para alimentación animal. Constituye junto con la patata y la tapioca, las materias primas más importantes para la obtención de almidón, de jarabes de glucosa y de bebidas alcohólicas. Para consumo humano se pueden obtener harinas de maíz, aceite de germen, productos para desayuno y conservas de maíz dulce, entre otros alimentos. Por su alto contenido de almidón, las harinas y sémolas de maíz son una fuente importante de calorías en la dieta de países de América Central y del Sur, donde este cereal es alimento básico [22].

La harina de maíz, al no contener gluten, sirve de base de harinas panificadoras para los enfermos celíacos, al igual que las harinas de arroz, quínoa, soya y mandioca [18]. La celiaquia se caracteriza por la intolerancia al gluten, en concreto son las prolaminas presentes en el trigo (gliadinas), avena (avidina), cebada (hordeína), centeno (secalina) y triticale; que resultan tóxicas para las personas con esta patología [10].

La actividad de agua ( $a_w$ ) es un parámetro que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas (p.e. oxidación de lípidos,

reacciones enzimáticas, reacción de Maillard) y desarrollo microbiano [5]. Por esto la actividad de agua es un parámetro bastante usado como indicador para predecir la vida útil de un alimento.

La isoterma de un producto relaciona gráficamente, a una temperatura constante, el contenido en humedad de equilibrio de un producto con la actividad termodinámica del agua del mismo, ya que en el equilibrio, este último parámetro es igual a la humedad relativa del aire que rodea al producto. Las isotermas son importantes para el análisis y diseño de varios procesos de transformación de alimentos, tales como secado, mezcla y envasado de los mismos. Además son importantes para predecir los cambios en la estabilidad de los alimentos y en la elección del material de empaque adecuado [31].

Para el maíz en grano entero existen varios estudios en cuanto a las características de secado, isotermas de adsorción y desorción, dependencia con la temperatura de almacenamiento y cálculo del calor isostérico de sorción [9, 7, 12]. La obtención y modelado de la isoterma de adsorción de agua de la harina de maíz, es de suma importancia para la determinación de materiales de embalaje, condiciones de almacenamiento, evaluación de mezclado con otras harinas u otros alimentos en polvo, para predecir su vida útil y para la determinación de condiciones óptimas de secado [4].

Varias ecuaciones empíricas y semiempíricas se han propuesto para correlacionar el contenido de humedad de equilibrio con la actividad de agua de un alimento, sin embargo, la ecuación de GAB (Guggenheim-Anderson-de

<sup>1</sup>Recebido para publicação em 8/12/2005. Aceito para publicação em 20/10/2006 (001649)

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería en Alimentos, Universidad de La Serena, Casilla, 599, La Serena, Chile,  
E-mail: avegag@userena.cl

\* A quem a correspondência deve ser enviada

Boer) es de amplio uso en alimentos y es recomendada por el proyecto Europeo COST 90, que trata sobre propiedades físicas en alimentos [30]. Esta ecuación está basada en la teoría de adsorción de BET (Brunauer-Emmett-Teller), la cual da una explicación física a los parámetros involucrados en ella [15]. Otro factor importante, a la hora de elegir la ecuación a utilizar, es la simplicidad y el tiempo que pueda necesitar el cálculo de la humedad de equilibrio [21].

El calor isostérico es un parámetro de mucha utilidad en los procesos de adsorción y desorción de agua en alimentos. En los procesos de deshidratación representa la energía requerida para romper las fuerzas moleculares entre las moléculas de vapor de agua y la superficie del adsorbente [23], y cuando ocurren fenómenos de adsorción de agua corresponde a la energía necesaria para que ocurra lo inverso.

El objetivo de este trabajo fue determinar experimentalmente las isotermas de adsorción de humedad de la harina de maíz a tres temperaturas (7, 22 y 45 °C), y modelarlas aplicando distintas ecuaciones propuestas en la literatura, además de determinar el calor isostérico de adsorción y modelarlo en función del contenido de humedad del producto con la ecuación propuesta por TSAMI [28].

## 2 - MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 - Determinación de la isoterma de adsorción

La harina de maíz utilizada se elaboró a partir de maíz cultivado en la ciudad de La Serena, Cuarta Región de Chile. Las isotermas se realizaron a tres temperaturas de trabajo (7, 22 y 45 °C). La metodología consistió en dejar en equilibrio una masa conocida de muestra (en triplicado) con su atmósfera, en un recipiente cerrado herméticamente, el cual

contiene un vaso con disolución saturada de sal de actividad de agua conocida (Tabla 1). A partir de ese momento se controló el peso de la muestra cada 10 días, hasta que se llega a peso constante (condición de equilibrio). A los recipientes que contenían sal con HR mayor a 75% se les adicionó Thymol en una placa Petri pequeña, para evitar el desarrollo microbiano, especialmente el enmohecimiento.

El contenido de humedad inicial y de equilibrio de las muestras se determinó por triplicado, siguiendo el método A.O.A.C. n° 934.06 [1], para lo cual se utilizó una balanza analítica marca CHYO Jex-120, de precisión 0,0001 g y una estufa a vacío, marca Gallenkamp.

**TABLA 1** – Sales y ecuaciones utilizadas para obtener la  $a_w$  a una temperatura (K) determinada.

Nomenclatura	Sal	Ecuación de regresión	r <sup>2</sup>
LiCl	Cloruro de Litio	$\ln a_w = (500,95 \times 1/T) - 3,85$	0,98
KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	Acetato Potasio	$\ln a_w = (861,39 \times 1/T) - 4,33$	0,97
MgNO <sub>3</sub>	Nitrato de Magnesio	$\ln a_w = (356,60 \times 1/T) - 1,82$	0,99
NaBr	Bromuro de Sodio	$\ln a_w = (442,80 \times 1/T) - 2,04$	1,00
KI <sub>2</sub>	Ioduro de Potasio	$\ln a_w = (255,90 \times 1/T) - 1,23$	1,00
NaCl	Cloruro de Sodio	$\ln a_w = (228,92 \times 1/T) - 1,04$	0,96
KCl	Cloruro de Potasio	$\ln a_w = (367,58 \times 1/T) - 1,39$	0,97
KNO <sub>2</sub>	Nitrato de Potasio	$\ln a_w = (244,61 \times 1/T) - 0,90$	0,90

Fuente: Labuza *et al.*, 1985. [16]

### 2.2 - Modelado de la isoterma de adsorción

Los datos experimentales se modelaron con las ecuaciones de: GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer), BET (Brunauer, Emmett y Teller), Henderson, Caurie, Smith, Oswin y Halsey, las que se presentan en la Tabla 2.

La calidad del ajuste de los modelos propuestos se evaluó por medio del coeficiente de correlación lineal (r<sup>2</sup>), el que debe ser superior a 0,85 para conseguir un buen modelado de los datos experimentales y por el porcentaje de error

**TABLA 2** – Ecuaciones a utilizar para el modelado de las isotermas de la harina de maíz.

Modelo	Ecuación	Parámetros
GAB	$X_w = \frac{X_m \cdot C \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot k \cdot a_w)}$	$X_m$ , es la humedad del producto correspondiente a la situación en que los puntos de adsorción primarios están saturados por moléculas de agua. C, es la constante de Guggenheim, característica del producto y relacionada con el calor de adsorción de la monocapa. k, es un factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.
BET	$X_w = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot a_w)}$	$X_m$ , es la humedad del producto correspondiente a una capa monomolecular de agua adsorbida C, constante característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de sorción
HENDERSON	$X_w = 0,01 \left[ \frac{-\log(1 - a_w)}{10^f} \right]^{1/n}$	n y f, son parámetros característicos del producto
CAURIE	$X_w = \exp \left[ a_w \cdot 1n(v) - \frac{1}{4,5 \cdot X_s} \right]$	v, es una constante característica del material. $X_s$ , contenido de humedad de seguridad que proporciona la máxima estabilidad al alimento deshidratado durante el almacenamiento
SMITH	$X_w = B + A \cdot \log(1 - a_w)$	A y B son constantes del modelo y características para cada alimento
OSWIN	$X_w = A \left[ \frac{a_w}{1 - a_w} \right]^B$	
HALSEY	$X_w = \left( \frac{A}{1n(1/a_w)} \right)^{1/B}$	

medio relativo (%E) (Ecuación 1) parámetro estadístico ampliamente utilizado en isotermas de alimentos [27].

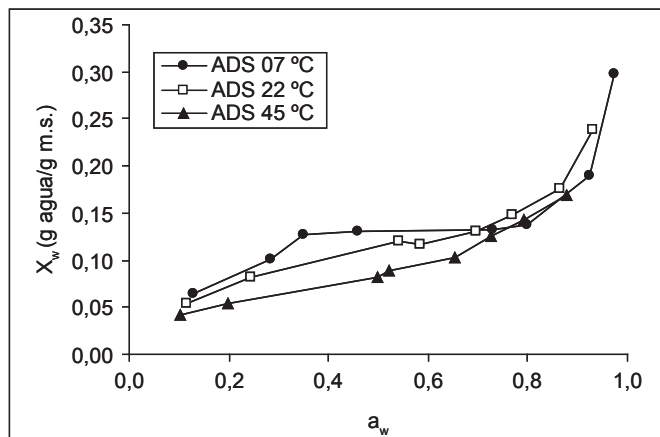
$$(\%)E = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ci}} \quad (1)$$

Donde:  $X_{ei}$  es el contenido de humedad experimental (g agua/g m.s.);  $X_{ci}$  es el contenido de humedad calculada a partir de cada modelo (g agua/g m.s.); y  $n$  es el número de observaciones.

### 3 - RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1 - Contenido de humedad de equilibrio

La humedad inicial de la muestra de harina de maíz, fue de  $0,129 \pm 0,001$  g agua/g m.s. La Figura 1 muestra los datos de humedad experimental obtenido en el equilibrio, en función de la actividad de agua para tres temperaturas de trabajo (7, 22 y 45 °C), en esta figura se puede observar que se obtuvieron isotermas de tipo II, de forma sigmoidea o tipo S, de las cinco establecidas por Van der Waals, las cuales son las más frecuentes en alimentos como frutas y verduras [20, 6].



**FIGURA 1** – Contenido de humedad de equilibrio experimental de la harina de maíz para las tres temperaturas de trabajo (7, 22 y 45 °C).

Como era de esperar, se observa que el contenido de humedad de equilibrio presenta una dependencia con la temperatura para casi todo el rango de actividad de agua en estudio [11], y solo después de una  $a_w$  mayor a 0,75 se aprecia un entrecruzamiento de las curvas, es decir, una independencia entre las temperaturas de trabajo, ya que, al parecer sobre 0,75 podría existir un aumento de la actividad enzimática y del movimiento entre moléculas de agua, carbohidratos y proteínas. Es evidente entonces que las muestras adsorbieron más agua a 7 y 22 °C que a los 45 °C, esto debido probablemente a que las moléculas de agua a bajas temperaturas tienen una menor energía cinética, la cual no es suficiente para superar la correspondiente energía de adsorción [17]. Al mismo tiempo, las moléculas de agua se enlazan con los componentes del producto, tales como

carbohidratos, proteínas y celulosa. Este tipo de enlace es de puentes de hidrógeno, provocando una reacción exotérmica, que disminuye con el aumento de la temperatura [19], puesto que la harina de maíz posee un alto contenido de carbohidratos y proteínas (macromoléculas), las cuales presentan grupos polares, como  $-OH$  y  $-H$ , que se comportan como centros activos de sorción [8]. Por lo general, para alimentos en polvo el contenido de humedad a una cierta actividad de agua, decrece a medida que aumenta la temperatura [8].

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se podría considerar como condiciones óptimas de almacenamiento de harina de maíz una humedad relativa del 75% y la temperatura entre 7 y 22 °C, para prevenir reacciones enzimáticas de deterioro de carbohidratos, proteínas, vitaminas, etc.

#### 3.2 - Modelado de las isotermas

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para los modelos propuestos, con sus respectivas constantes, además de los valores de  $r^2$  y del %E. En general, todas las ecuaciones propuestas presentaron un buen ajuste de los datos experimentales, dando coeficientes de correlación ( $r^2$ ) superiores a 0,92 y un %E en promedio para las tres temperaturas inferior al 10% con todos los modelos. Las ecuaciones de GAB y BET, ampliamente utilizadas en alimentos pues dan explicación termodinámica a sus constantes, presentaron un %E menor o igual al 10% para las tres temperaturas de trabajo y ajustan correctamente los datos experimentales. El modelo de GAB ha sido ampliamente utilizado en muchos alimentos y cereales en polvo. Como se muestra en la Tabla 3, los valores obtenidos para la humedad de la monocapa de la ecuación de GAB ( $X_m = 0,053-0,115$  g agua/g m.s.) son mayores con respecto a los obtenidos con la ecuación de BET ( $X_m = 0,042-0,079$  g agua/g m.s.); resultados similares obtuvieron SOPADE & AJISERIGI [25] y TIMMERMANN *et al.* [26], para granos y afrecho de maíz, respectivamente, reportando que la humedad de la monocapa para los modelos GAB y BET no son similares. Por otra parte, en la misma tabla se muestra la tendencia a disminuir del contenido de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) al aumentar la temperatura, lo que puede deberse a la menor disponibilidad de los sitios activos (o enlaces de hidrógeno) en los polímeros de almidón para la unión con el agua [29].

La ecuación de Henderson también ajustó correctamente los datos de humedad experimental para todo el rango de actividad de agua, y su utilización es adecuada para alimentos con alto contenido de almidón [25]. La utilización de la ecuación de Caurie es de importancia en el modelado de isotermas de alimentos deshidratados, ya que nos entrega el parámetro llamado "contenido de humedad de seguridad" ( $X_s$ ), que indica el contenido de humedad al cual se lograría la máxima estabilidad del alimento durante su almacenamiento. En este estudio se obtuvieron valores de  $X_s$  cercanos a 0,07 g agua/g m.s., observándose además una dependencia de este parámetro con la temperatura. En

función de los valores del  $r^2$  y E%, las ecuaciones propuestas por Smith, Oswin y Halsey demostraron ser útiles a la hora de modelar la isoterma de adsorción de este producto. La ecuación de Halsey ha servido para explicar la condensación de las multicapas de agua para la harina de maíz [4].

**TABLA 3** – Resumen de las constantes y estadísticos obtenidos de cada modelo propuesto para la isoterma de adsorción a las tres temperaturas utilizadas.

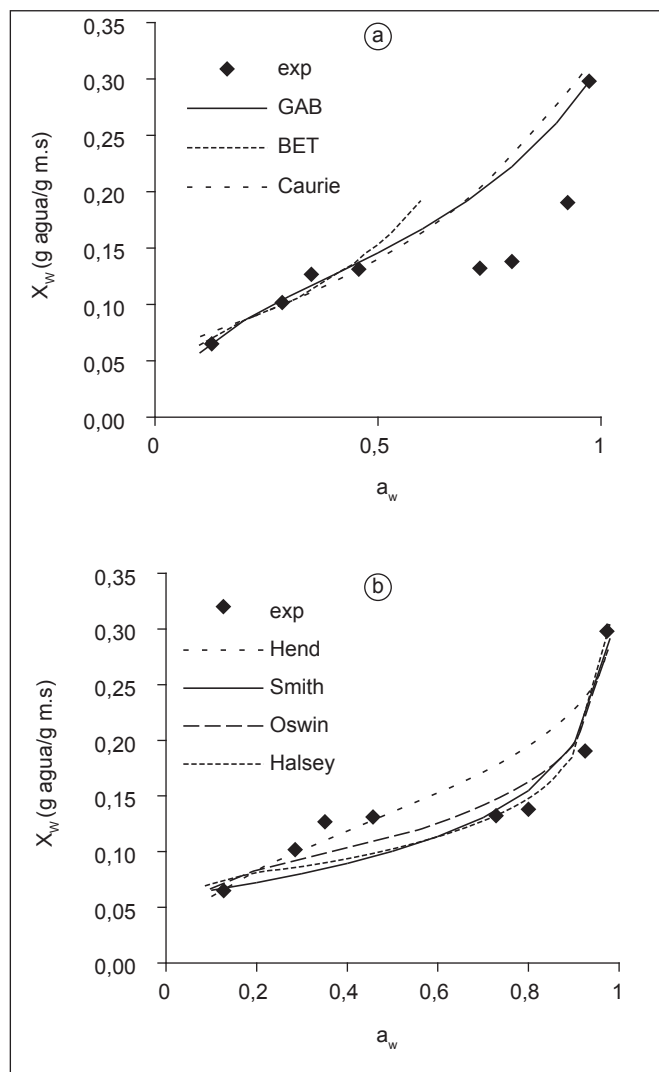
Modelo		7 °C	22 °C	45 °C
GAB	$X_m$	0,115	0,082	0,053
	C	12,36	23,23	29,83
	k	0,647	0,622	0,794
	$r^2$	0,94	0,98	0,99
	%E	3,28	7,02	1,77
BET	$X_m$	0,079	0,056	0,042
	C	24,68	502,82	146,17
	$r^2$	0,95	0,99	0,99
	%E	6,70	10,53	3,27
HENDERSON	n	2,341	2,219	2,094
	f	-3,172	-2,856	-2,537
	$r^2$	0,947	0,968	0,974
	%E	8,955	10,653	6,466
CAURIE	$X_s$	0,079	0,074	0,067
	v	5,401	4,695	5,619
	$r^2$	0,96	0,95	0,99
	%E	7,60	10,43	3,18
SMITH	A	-0,137	-0,150	-0,149
	B	0,059	0,056	0,038
	$r^2$	0,94	0,98	0,99
	%E	10,12	6,49	3,08
OSWIN	A	0,114	0,106	0,086
	B	0,237	0,299	0,345
	$r^2$	0,93	0,99	0,99
	%E	11,51	6,99	2,52
HALSEY	A	0,001	0,002	0,004
	B	3,209	2,516	2,010
	$r^2$	0,96	0,96	0,99
	%E	7,84	6,66	4,16

En la figuras 2, 3 y 4 se presentan las curvas experimentales y modeladas a 7, 22 y 45 °C, respectivamente, utilizando las siete ecuaciones propuestas.

La dependencia con la temperatura de las constantes fisicoquímicas más importantes ( $X_m$ , C, k y  $X_s$ ) se evaluaron con la ecuación de Arrhenius (Ecuación 2). Obteniendo así la energía de activación ( $E_a$ ), que representa la energía necesaria para unir o romper la primera monocapa de agua entre el sistema sólido-agua, donde la formación del enlace sólido-agua (adsorción) requiere de mayor energía que romper tal unión (desorción) definida por SOEKARTO & STEINBERG [24].

$$\ln(D) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

Donde: D es la constante en estudio;  $D_0$  es el factor de Arrhenius;  $E_a$  es la energía de activación (kJ/mol); R es la constante universal de los gases y T es la temperatura absoluta (K).



**FIGURA 2** – Isotermas de adsorción de harina de maíz a 7 °C, datos experimentales y su modelado.

La Tabla 4 resume los valores de energía de activación y el coeficiente de correlación lineal obtenidos para las constantes analizadas que presentaron dependencia con la temperatura. En ella se observa que la constante de Guggenheim (C) del modelo de GAB, también presentó una leve dependencia con la temperatura, ya que se relaciona con la entalpía del sistema [2], mientras que para la constante k (de GAB) no se observó dependencia con este parámetro físico. El otro parámetro importante que presentó dependencia con la temperatura y que se describe en la Tabla 4, fue el contenido de humedad de seguridad ( $X_s$ ) del modelo de Caurie, el cual requiere menos energía para su activación.

**TABLA 4** – Energía de activación de las constantes  $X_m$ , C y  $X_s$ .

Modelo	$E_a$ (kJ / mol)	$r^2$
$X_m$ (GAB)	15,09	0,99
$X_m$ (BET)	12,09	0,97
$X_s$ (Caurie)	3,34	0,99
C (GAB)	16,68	0,89

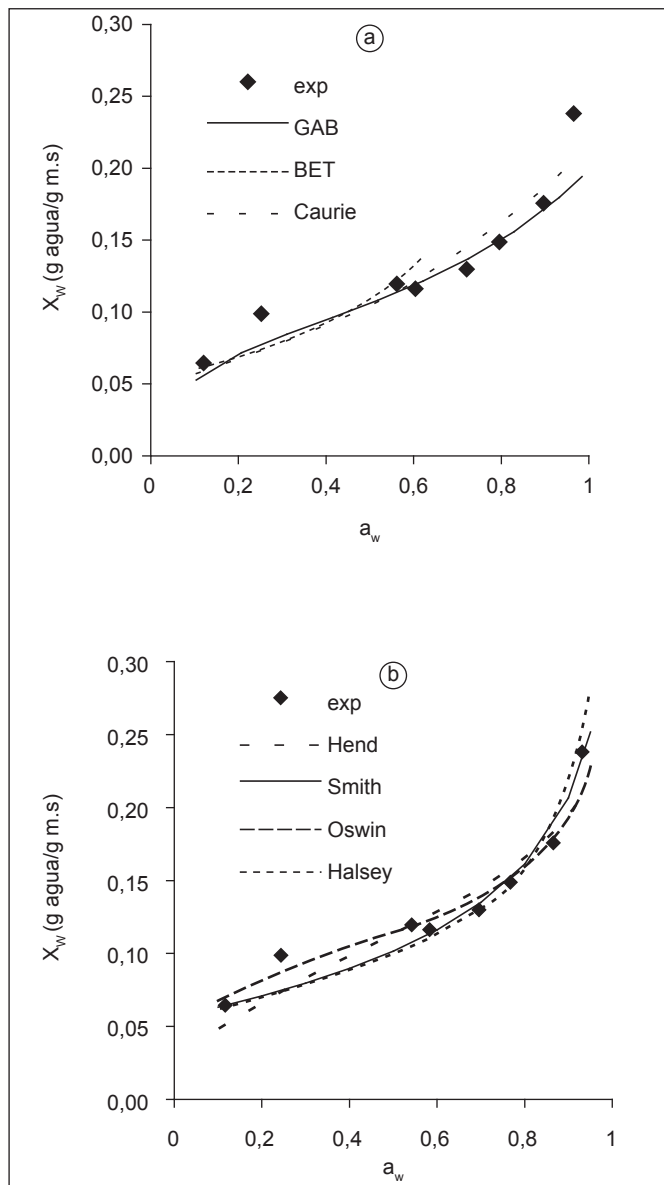


FIGURA 3 - Isotermas de adsorción de harina de maíz a 22 °C, datos experimentales y su modelado.

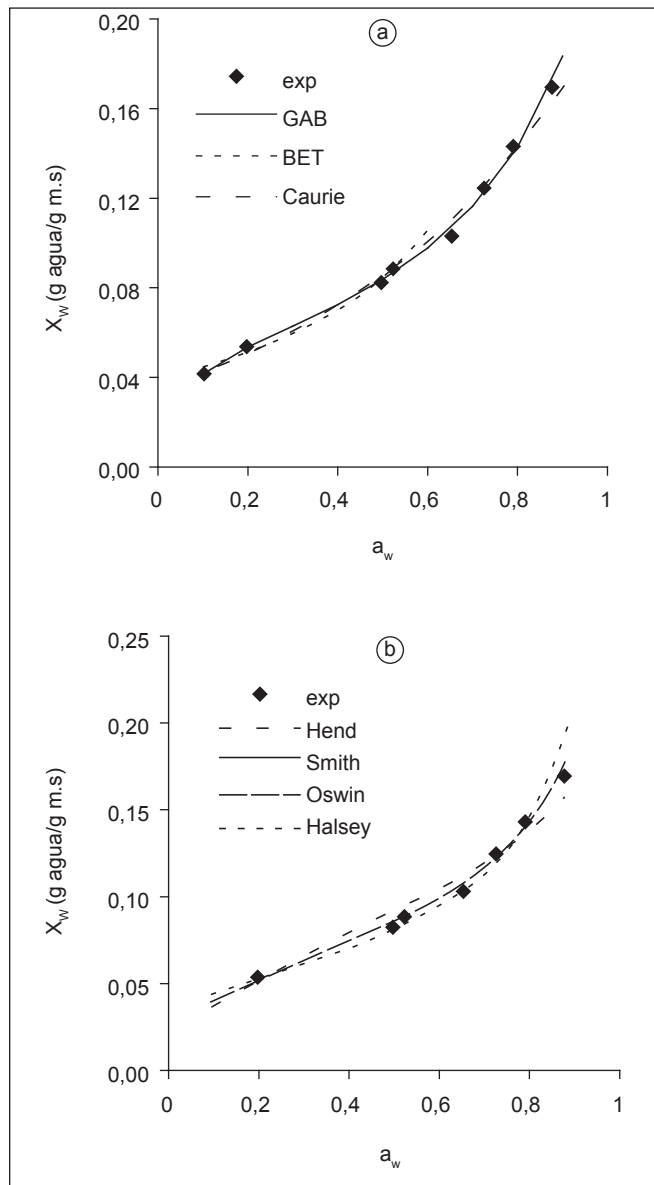


FIGURA 4 - Isotermas de adsorción de harina de maíz a 45 °C, datos experimentales y su modelado.

### 3.3 - Obtención de calor isostérico neto de adsorción

El calor isostérico neto de adsorción ( $Q_s$ ) se define como el calor total de adsorción de agua del alimento ( $\Delta H$ ) menos el calor de vaporización de agua pura ( $\Delta H_v$ ), a una determinada temperatura, y puede ser determinado por medio de la ecuación de Clausius-Clayperon (Ecuación 3), ya que al graficar el  $\ln a_w$  versus  $1/T$  (K) para ciertos valores humedad se obtiene una línea recta de cuya pendiente ( $-\Delta H/R$ ) se puede calcular el  $Q_s$  [20].

$$\ln p = \frac{-\Delta H}{R} \cdot \frac{1}{T} + C \tag{3}$$

Donde:  $p$  es la presión de vapor de agua en equilibrio con el material, a una temperatura determinada, recordando

que  $a_w = p/p_o$ ;  $p_o$  es la presión de vapor del agua pura;  $\Delta H$  es el calor total de adsorción del sistema alimento-agua;  $R$  es la constante universal de los gases y  $T$  es la temperatura absoluta (K).

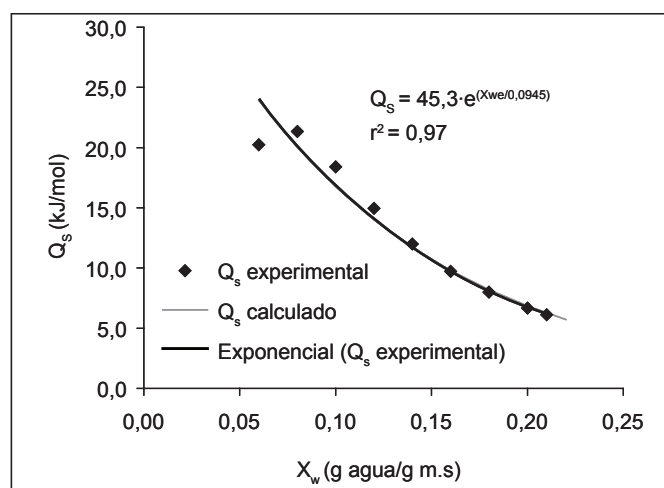
TSAMI *et al.* (28) propusieron empíricamente un modelo exponencial entre  $Q_s$  y el contenido de humedad del producto ( $X_w$ ), con dos constantes,  $Q_o$  y  $X_o$  (Ecuación 4).

$$Q_s = Q_o \cdot e^{(-X_w/X_o)} \tag{4}$$

Donde:  $X_{we}$  es la humedad de equilibrio (g agua/g m.s),  $Q_o$  es el calor isostérico de adsorción (kJ/mol) de la primera molécula de agua en el alimento y se define cuando  $X_{we} \rightarrow 0 \Rightarrow Q_s \rightarrow Q_o$ , y  $X_o$  es el contenido de humedad característico para cada producto cuando  $Q_s$  ha sido reducido en un 63% [15].



En la *Figura 5* se observa que el  $Q_s$  de harina de maíz decrece rápidamente desde 21 a 6 kJ/mol, con un aumento de  $X_w$  de 7 a 21 (%b.s). IGLESIAS *et al.* [13], trabajando con harina de trigo, reportó que el  $Q_s$  disminuye desde 20 a 4 kJ/mol con respecto al aumento del contenido de humedad de 7 a 14 g agua (base seca). ERBAŞ *et al.* [8] obtuvieron un máximo de  $Q_s$  de 15,2 kJ/mol para un contenido de humedad de 6-7% en sémola, y de 14,34 kJ/mol en harina de trigo. AL-MUHTASEB *et al.* [3], trabajando con almidón en polvo de patata, obtuvo un calor de adsorción de 80 kJ/mol a 3-4% g agua/g m.s. Por otra parte, se apreció que los valores de  $\Delta H$  son más altos que el calor de vaporización del agua pura ( $\Delta H_v$ ), para todo el rango de  $X_w$ , lo que puede indicar que la energía de enlace entre las moléculas y el sitio de adsorción es mas alto que la energía, a la cual se mantienen las moléculas de agua pura junto a la fase líquida [14].



**FIGURA 5** – Ajuste de los valores experimentales de  $Q_s$  de la harina de maíz con la ecuación empírica de Tsami.

#### 4 - CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de esta investigación, se puede concluir que todas las ecuaciones utilizadas modelaron correctamente datos experimentales para las tres temperaturas de trabajo; no obstante, destacan por los buenos ajustes obtenidos las ecuaciones de GAB, Oswin y Halsey, con valores de  $r^2$  superiores a 0,96 y con %E inferiores al 10%.

Además, se observó que la isoterma de adsorción de humedad de la harina de maíz presentó una clara dependencia con la temperatura para valores de  $a_w$  inferiores a 0,75, no observándose esta dependencia para valores superiores de actividad de agua, donde se presenta la mayor capacidad higroscópica del producto.

La humedad de monocapa ( $X_m$ ) calculada con las ecuaciones de BET y GAB, presentó dependencia con la temperatura, debido a que a una menor temperatura disminuye la energía cinética de las moléculas de agua lo que hace limitar la capacidad higroscópica del producto hasta el

valor máximo de  $X_m$ , obteniendo también una energía de activación promedio de 13,59 kJ/mol.

Para el cálculo del  $Q_s$  en función del contenido de humedad del producto, se comprobó la validez de la ecuación propuesta por Tsami, lográndose un valor máximo de 21,68 kJ/mol para un contenido de humedad de 0,075 g agua/g m.s.

#### 5 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. O. A. C. Official Method of Analysis. **Association of official analytical chemists**, nº 934.06, Arlington, VA, 1990.
- [2] AL-MUHTASEB, A. H.; MCHIMN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherm of starch powders Part 1: mathematical description of experimental data. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 297-307, 2004a.
- [3] AL-MUHTASEB, A. H.; MCHIMN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherm of starch powders Part 2: Thermodynamic characteristics. **Journal of Food Engineering**, v. 62, n. 2, p. 135-142, 2004b.
- [4] CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for fitting water sorption isotherm of foods: Part I: a review. **Journal of Food Technology**, v. 13, p. 159-174, 1978.
- [5] COMAPOSADA, J.; GOU, P.; ARNAU, J. The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms. **Meat Science**, v. 55, n. 3, p. 291-295, 2000.
- [6] DEBNATH, S.; HEMAVATHY, J.; BHAT, K. K. Moisture sorption studies on onion powder. **Food Chemistry**, v. 78, n. 4, p. 479-482, 2002.
- [7] DOYMAZ, I.; PALA, M. The thin - layer drying characteristics of corn. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 2, p. 125-130, 2003.
- [8] ERBAŞ, M.; ERTUGAY, M. F.; CERTEL, M. Moisture adsorption behaviour of semolina and farina. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 2, p. 191-198, 2005.
- [9] FALABELLA, M. C.; AGUERRE, R. J.; SUÁREZ, C. Modelling non - isothermal sorption equilibrium data of cereal grains. **Lebensmittel - Wissenschaft und Technologi**, v. 25, n. 3, p. 286-288, 1992.
- [10] FASANO, A.; CATASSI, C. Current approaches to diagnosis and treatment of celiac disease: an evolving spectrum. **Gastroenterology**, v. 120, n. 3, p. 636-651, 2001.
- [11] FOSTER, K. D.; BRONLUND, J. E.; PATERSON, A. H. J. The prediction of moisture sorption isotherm for dairy powder. **International Dairy Journal**, v. 15, n. 4, p. 411-418, 2005.
- [12] HAROS, M.; TOLOBA, M. P.; SUÁREZ, C. Influence of corn drying on its quality for the wet - milling process. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 2, p. 177-184, 2003.
- [13] IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. Isosteric heats of water vapor sorption on dehydrated foods. Part I. Analysis of the differential heat curves. **Lebensmittel - Wissenschaft und Technologi**, v. 9, p. 116-122, 1976.
- [14] IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J.; MONTAN, C. F. On the temperature dependence of isosteric heats of water

- sorption in dehydrated foods. **Journal of Food Science**, v. 54, p. 1620-1623, 1989.
- [15] KIRANOUDIS, C. T.; MAROULIS, Z. B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. **Journal of Food engineering**, v. 20, n. 1, p. 55-74, 1993.
- [16] LABUZA, T. P.; KAAANANE, A.; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherm and water activity shift of two dehydrated food. **Journal Food Science**, v. 50, n. 2, p. 392-396, 1985.
- [17] LAGOUDAKI, M.; DEMERTZIS, P. G.; KONTOMINAS, M. G. Moisture adsorption behaviour of pasta products. *Lebensmittel – Wissenschaft und Technologi*, v. 26, n. 6, p. 512-516, 1993.
- [18] LARA, E.; CORTÉS, P.; GAHONA, E. Enfermedad Celíaca: El Mercado de los Alimentos para Regímenes Especiales. **Industria Alimentos**, v. 8, n. 33, p. 18-21, 2004.
- [19] LEVINE, I. N. **Physical chemistry**, 4a Ed.; New Cork: McGraw – Hill, 1995.
- [20] MARTÍNEZ, N.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A.; FITO, P. **Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno. Servicio de Publicaciones**, Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 98.4034, 1998.
- [21] MCLAUGHLIN, C. P.; MAGEE, T. R. A. The Determination of Sorption Isotherm and the Isosteric Heats of Sorption for Potatoes. **Journal of Food Engineering**, v. 35, n. 3, p. 267-280, 1998.
- [22] PRIMO, E. **Química de los Alimentos**, 1° Ed., Editorial Síntesis S.A. Madrid, 1998.
- [23] RIZVI, S. S. H. Thermodynamics properties of food in dehydration. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds); **Engineering Properties of Foods**. New York: Marcel Dekker Inc, Cap. 3, p. 223-309, 1995.
- [24] SOEKARTO, S. T.; STEINBERG, M. P. Determination of binding energy for the three fractions of bound water. In. *Water Activity: Influences on Food Quality*, (L. B. Rockland and G. F. Stewart, ed), **Academics Press**, New York, p. 265-279, 1981.
- [25] SOPADE, P. A.; AJISEGIRI, E. S. Moisture sorption study on Nigerian foods: maize and sorghum. **Journal of Food Process Engineering**, v. 17, n. 1, p. 33-56, 1994.
- [26] TIMMERMANN, E. O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Water sorption isotherm of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?. **Journal of Food Engineering**, v. 48, n. 1, p. 19-31, 2001.
- [27] TOLOBA, M. P.; PELTZER, M.; ENRIQUEZ, N.; POLLIO, M. L. Grain sorption equilibria of quinoa grains. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 365-371, 2004.
- [28] TSAMI, E.; MAROULIS, Z. B.; MORUNOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G. D. Water sorption isotherm of raisins, currants, figs, prunes and apricots. **Journal Food Science**, v. 55, n. 6, p. 1594-1597, 1990.
- [29] WESTGATE, N.; LEE, J. Y.; LADISCH, M. R. Modelling of equilibrium sorption of water vapour on starchy materials. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 35, n. 1, p. 213-219, 1992.
- [30] WOLF, W.; SPIESS, W. E. L.; JUNG, G.; WEISSER, H.; BIZOT, H.; DUCKWORTH, R. B. The water-vapour sorption isotherms of microcrystalline cellulose and purified potato starch. Results of collaborative study. **Journal of Food Engineering**, v. 3, n. 1, p. 51-73, 1984.
- [31] ZHANG, X.; XIE LIU, DE-XIANG GU, WEI ZHOU, REN-LI WANG, PEN LIU. Desorption Isotherms of Some Vegetables. **Journal Science Food Agriculture**, v. 70, n. 3, p. 303-306, 1996.