

Influencia del Tamaño de Partículas en las Isotermas de Adsorción del Harina de Haba (*Vicia faba* L.)

Matos-Chamorro, Alfredo¹; Rajo-Angulo, Renzo²

Resumen

El objetivo fue evaluar la influencia del tamaño de partícula sobre la capacidad de adsorción de humedad de la harina de haba (*Vicia faba* L.). En la obtención de la harina fue determinada la cinética de secado, encontrándose como humedad inicial 63 % bh para el haba fresca y 10 % bh en la harina. Las isotermas de adsorción fueron determinadas utilizando el método estático, con soluciones saturadas y de a_w conocida (LiCl = 0.11; MgCl₂ = 0.23; NaHCO₃ = 0.54; NaCl = 0.75; KNO₃ = 0.93), hasta obtener el equilibrio másico a temperatura constante (25 °C); las muestras de diferentes tamaños fueron obtenidas por la utilización de tamices (malla 12, 16, 20 y 32). Los valores experimentales de las isotermas de adsorción se ajustaron a siete modelos matemáticos aplicados en alimentos. Para el modelo B.E.T. el valor de monocapa (X_m) se encuentra entre los valores de 0.02946 y 0.03691 g H₂O / 100g de MS. Mientras que en el modelo G.A.B el valor de la capa monomolecular varía entre 0.15817 y 0.18936 g H₂O / 100g de MS. La mejor calidad de ajuste se observa para el modelo propuesto por Henderson, con un ERM de 4.57 % para la malla 20.

Palabras Clave: Isotermas de adsorción, haba, actividad de agua, *Vicia faba*.

Influence of Particle Size on Adsorption Isotherms of Bean Flour (*Vicia faba* L.) and Derivatives

Abstract

This study evaluated the influence of particle size on the moisture adsorption capacity of bean flour (*Vicia faba* L.). The flour was used to determine the kinetics of drying, as a result initial moisture content was found as 63% wet basis (bw) for the fresh beans and 10% (bw) in the flour. The adsorption isotherms were determined using the Static Method with saturated solutions of known a_w (LiCl = 0.11; MgCl₂ = 0.23; NaHCO₃ = 0.54, NaCl = 0.75; KNO₃ = 0.93) to obtain the mass balance at constant temperature (25°C) with sample sizes obtained by the use of sieves (mesh 12, 16, 20 and 32). The experimental adsorption isotherms were adjusted to seven mathematical models applied in food. For model B.E.T. monolayer value (X_m) is between the values of 0.02946 and 0.03691 g H₂O / 100 g MS. However, in the GAB model monolayer, this value varies between 0.15817 and 0.18936 g H₂O / 100 g MS. The best fit is observed for the model proposed by Henderson, with a 4.57 % for ERM of the mesh 20.

Keywords: Adsorption isotherms, beans, water activity, *Vicia faba*.

Introducción

La actividad de agua es un factor determinante en el estudio de la estabilidad de los alimentos secos (Iglesias y Chirife 1982). Se define también como la relación entre la presión de vapor de agua del alimento y la presión de vapor del agua líquida pura a la misma temperatura (Singh y Heldman 1998).

Las isotermas de adsorción muestran la relación entre la actividad de agua (a_w) y la humedad de equilibrio (X_m) contenida en un producto alimenticio, a una temperatura y presión constante (Chavez y otros 2004). Esta relación ha sido ampliamente estudiada para lograr una descripción matemática del proceso y es así que se han propuesto diversas ecuaciones, entre las que encontramos el modelo de Brunauer, Emmett y Teller (Brunauer y otros, 1938) que presenta un rango de aplicación, hasta un a_w de 0.3 – 0.4, el

¹ Universidad Peruana Unión. alfredom@upeu.edu.pe

²EAP Ingeniería de Alimentos, Universidad Peruana Unión, r3nzoa@gmail.com

modelo de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB) propuesto formalmente por (Van den Berg 1981) con un rango de aplicabilidad de 0.1 a 0.9 de aw. Además de los modelos de Henderson, Caurie, Hasley, Iglesias-Chirife y Smith.

El agua contenida en las leguminosas, como en muchos alimentos, se presenta en distintas formas, en función de las interacciones que existan entre los componentes de la materia seca del alimento y las moléculas de agua (Labuza 1984).

Una operación que tiende a reducir el contenido de humedad de un producto y generalmente se lleva a cabo por aire caliente, es el secado (Ocampo 2006). Esta técnica de secado fue ampliamente utilizada desde los albores de la humanidad, los alimentos secos proporciona al hombre la posibilidad de subsistir en épocas de carencia de alimentos (Fito y otros, citados por Vega y otros 2005).

El secado por aire caliente es una operación que tiende a reducir el contenido de humedad de un producto (Ocampo 2006). Las curvas de cinética de secado dan idea del tiempo necesario de secado, del consumo de energía, del mecanismo de transferencia de masa, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa, y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables de proceso tales como: la temperatura, humedad de entrada, velocidad del aire, etc. (García y otros 2007). Esto permite realizar un diseño o una selección más eficiente de secaderos así como de las variables de proceso.

El haba es una leguminosa cultivada en el Perú, tiene un 25.2 % de contenido proteico promedio. Las formas de consumo más difundidas son en fresco, seco y harina (Cerrate y otros 1981). El Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA 2007) registra que en el Perú se siembra aproximadamente 50 000 ha de haba (*Vicia faba* L.) ocupando un segundo lugar después del frejol común (48 000 toneladas de grano seco), y se pierde aproximadamente 15% anualmente por mal almacenamiento.

La estabilidad de los alimentos durante el almacenamiento depende del contenido y control de humedad. Puesto que, el principal y más importante constituyente en ellos es el agua. Su disponibilidad es expresada como actividad de agua y ésta influye de manera directa en procesos de secado, mezclado, almacenado, empaçado y otras operaciones de proceso. Para cada alimento existe una actividad de agua óptima donde la estabilidad frente al deterioro es mayor (Matos 1992).

El conocimiento de las isotermas de adsorción de alimentos es de gran importancia para el desarrollo en la industria alimenticia, ya que brindan información útil para la optimización del proceso de secado y el diseño de secaderos, la selección del material de empaquetamiento, la predicción de la vida útil del producto y de la evolución en el contenido de humedad durante el almacenamiento (Gal 1987).

El objetivo de este trabajo fue determinar las isotermas de adsorción de la harina de haba a cuatro diferentes tamaños de partículas y luego fueron ajustados a los modelos matemáticos de BET, Henderson, Oswin, Hasley, Iglesias y Chirife, Smith y GAB. A partir de las isotermas de adsorción, se obtendrían los contenidos máximos de humedad a los cuales pueden ser almacenados; y finalmente se evaluará la calidad de ajuste con el error relativo medio (ERM).

Materiales y Métodos

Materia prima

Fue utilizada el haba (*Vicia faba* L.) de la variedad Pacae Blanco Mantaro proveniente de la ciudad de Huancayo. El trabajo de investigación se desarrolló en los ambientes del Centro de Investigación en Ciencias de Alimentos (CICAL) de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión.

El contenido de humedad fue determinado por método gravimétrico. Dos gramos de materia prima fueron pesados y secados en estufa a 80 °C por 24 horas (hasta peso constante). La humedad fue expresada en porcentaje de base

húmeda (% bh), la determinación fue realizada por triplicado.

El secado de las habas fueron realizadas en un secador de bandejas. La temperatura de proceso de 60 °C y con un flujo de aire de 1,5 m/s. Dependiendo del periodo de velocidad de secado, las muestras fueron retiradas periódicamente (5, 10, 20 y 30 min) a fin de determinar su peso. Los experimentos fueron realizados hasta alcanzar el peso constante. Luego se procedió a la molienda del haba seca, la clasificación de la granulometría se utilizó la escala de tamices Tyler con diferentes números de malla (Tabla 1).

Tabla 1- Escala de Tamices Tyler Estándar

Tamiz	Abertura del tamiz (cm)	# Malla
4	0,14	12
5	0,1	16
6	0,08	20
7	0,05	32

Fuente: Geankoplis (2006)

Isotermas de adsorción

Los datos obtenidos de las isotermas de adsorción fueron realizados por el método estático, que consiste en dejar en equilibrio una masa conocida de muestra (en triplicado) a una atmosfera con humedad relativa conocida, en un recipiente cerrado herméticamente, conteniendo alguna solución saturada (Tabla 2), este proceso de equilibrio puede requerir varios días y/o semanas (Francisco y otros 2006).

Tabla 2- Soluciones salinas saturadas y sus respectivas humedades relativas a 25° C

Solución Saturada	Humedad Relativa (%)
LiCl	11
MgCl ₂	33
NaHCO ₃	54
NaCl	75
KNO ₃	93

Modelos matemáticos

Los datos obtenidos fueron ajustados en modelos matemáticos de isotermas más utilizados en el área de alimentos (Tabla 3). Además los datos experimentales obtenidos se ajustaron con la ayuda del software MICROCAL ORIGIN 5.0 (Microcal Software Inc.1997). Para comparar la calidad de ajuste de los modelos matemáticos de BET, Henderson, Oswin, Hasley, Iglesias y Chirife, Smith y GAB se usó el error relativo medio (ERM) (Ecuación 1). Este parámetro estadístico es ampliamente utilizado en isotermas de alimentos (Gálvez 2006).

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

Donde:

X_{ei} = Contenido de humedad experimental (g agua/ g ms).

X_{ci} = contenido de humedad calculado a partir de cada modelo (g agua/ g ms).

n = Número de observaciones.

Según Lomauro y Bizot (citado por Matos 1992, p. 74) el valor de ERM igual o menor a cinco se considera como buen ajuste del modelo a los datos de adsorción.

Resultados y Discusión

El contenido de humedad inicial del haba fresco fue de 0.63 % (bh). Mientras que el contenido de humedad del harina de haba en sus diferentes números de mallas fue de 0.10% (bh), por lo que fue necesario llegar hasta ésta humedad para determinar las isotermas de adsorción.

En la figura 1 se observa que la humedad disminuye en función del tiempo. La humedad de equilibrio se alcanzó a los 120 minutos aproximadamente y luego sigue una etapa más donde las variaciones del contenido de humedad son muy escasas, además se menciona que a partir de los 150 minutos el contenido de humedad del haba comienza a permanecer constante. Este resultado es similar a los

Tabla 3- Modelos matemáticos de isotermas de adsorción más utilizados en el área de alimentos

Modelos Experimentales	Ecuaciones
BET	$\frac{X}{X_m} = \frac{C \cdot a_w}{(1 - a_w) [1 + (C - 1)a_w]}$
Henderson	$m = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-A} \right]^{\frac{1}{B}}$
Oswin	$m = A \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B$
Hasley	$m = \left[\frac{-A}{\ln a_w} \right]^{1/B}$
Iglesias-Chirife	$X = K_2 + K_1 \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]$
Smith	$X = A_2 - B_2 \ln(1 - a_w)$
GAB	$\frac{X}{X_m} = \frac{C' \cdot K' \cdot a_w}{(1 - K' \cdot a_w)(1 - K' \cdot a_w + C' \cdot K' \cdot a_w)}$

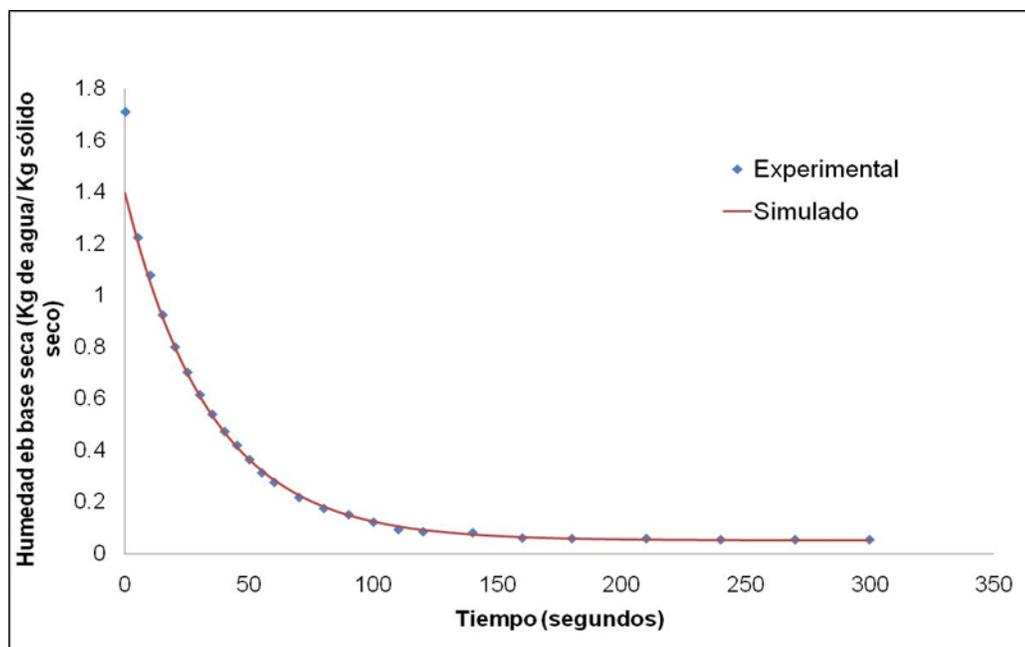


Figura 1- Curvas de secado de la haba a 40 °C

presentados en el secado de ciertas hortalizas y legumbres (Olivas y otros 1999).

En la tabla 4 se puede observar los valores de las constantes de los modelos de ajuste, el ERM además de los contenidos de humedad correspondientes a los valores de sus monocapas (X_m).

Los valores de las constantes de GAB fueron obtenidos por un arreglo a una ecuación cuadrática. El valor de la capa monomolecular varia entre 0.15817 y 0.18936 g H₂O / 100 g de MS, a 25° C. Los valores de X_m encontrados están dentro del rango de aplicabilidad de 0.1 a 0.9 de a_w (Barboza y Vega 1996). La calidad de ajuste de este modelo, medido por el ERM, es buena (6.09 %) para la harina trabajada con la malla 12.

Los distintos números de mallas clasifican a las partículas en distintos tamaños, y como se observa, a medida que el tamaño de las partículas se reduce el ERM (%) aumenta, poniendo en evidencia que el tamaño puede afectar la calidad de ajuste de los modelos. A esto se debe considerar el efecto acumulativo del tamizado, en donde las mallas utilizadas solo retienen partículas superiores al diámetro de sus aberturas, dejando pasar todas las partículas menores a la abertura establecida. Esto significa que habrá una muestra con tamaños de partículas heterogéneas, incrementando el error en las mediciones.

Otro aspecto que ocurre en la muestra durante el tiempo que estuvieron en las campanas, en

Tabla 4 - Resúmenes de los ajustes de los modelos de isotermas de adsorción, el valor de las constantes y el ERM obtenidos de cada modelo propuesto a cuatro números de mallas

Modelo	Constantes del modelo	Malla 12	Malla 16	Malla 20	Malla 32
GAB	X_m	0,15817	0,16489	0,18936	0,15966
	C	17,54171	31,48182	14,8343	16,16651
	K	0,68903	0,68379	0,62752	0,63762
	ERM (%)	6,09	23,75	25,42	25,06
BET	X_m	0,03316	0,03691	0,03422	0,02946
	C	-2,80275	-11,41502	-2,72074	-2,744
	ERM (%)	51,81	59,94	84,96	85,40
OSWIN	A	0,21373	0,23544	0,23127	0,2004
	B	0,27593	0,25232	0,25522	0,25372
	ERM (%)	8,01	22,65	26,68	23,91
HASLEY	A	0,0063	0,00576	0,00562	0,00341
	B	2,9769	3,23478	3,21281	3,23768
	ERM (%)	13,3538	9,62	14,65	13,82
HENDERSON	A	15,7097	17,76517	17,36715	24,09624
	B	2,0774	2,31014	2,26452	2,26368
	ERM (%)	7,6201	7,61	4,57	8,95
IGLESIAS Y CHIRIFE	A	0,1752	0,19668	0,19313	0,16804
	B	0,0201	0,01973	0,01938	0,01653
	ERM (%)	25,4021	19,94	26,40	25,07
SMITH	A	0,1163	0,13907	0,13382	0,11612
	B	0,1232	0,12074	0,12116	0,10459
	ERM (%)	10,13	7,17	12,16	11,33

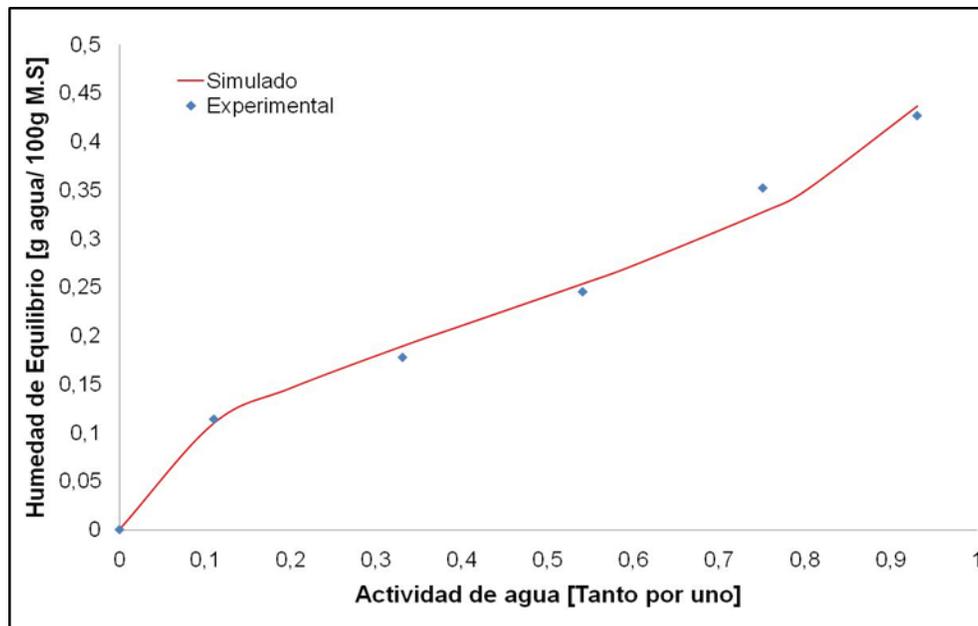


Figura 2 - Isoterma de adsorción de la harina de haba para la malla 20 de tamices Tyler

especial aquellas con alta a_w , es el hinchamiento de las moléculas de almidón debido a su carácter hidrofílico y si estas modificaciones son evaluadas con modelos de amplio rango el ERM % se incrementará. Según Chhinnam y Benchat (citado por Matos 1992, p. 74) el modelo de Henderson es una de las ecuaciones clásicas en la descripción de isotermas de cereales, derivados de cereales, leguminosas y frutas procesadas en un rango amplio de humedad relativa de 0.10 hasta 0.75

El mejor modelo fue aquel que no superó el valor de 0.75 de a_w (modelo de Henderson). En la figura 2 se muestra la representación del ERM % con los valores observados.

Conclusiones

La calidad de ajuste con los parámetros obtenidos es buena para el modelo de Henderson trabajado con la malla 20, el cual tiene un tamaño de partícula menor al 0.08 cm. El error relativo medio (ERM) para este modelo es de 4.57 %. Los distintos números de mallas clasifican a las partículas en distintos tamaños, y como vemos, a medida que el tamaño de la partícula se reduce el ERM % aumenta, poniendo en evidencia que el tamaño de las partículas sí afecta la calidad de ajuste de los modelos.

Referencia

- Barboza G. Vega H. 1996. Dehydration of Foods. New York: Editorial Chapman Hall. 330p.
- Bunauer S. Emmett P. Teller E. 1938. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. Journal of American Chemists Society. 309-319 p.
- Cerrate V. Camarena M. Chiappe L. 1981. Cultivo del Haba, Mejoramiento Genético, Agronomía, Almacenamiento y Conservación. Proyecto de Menestras, Departamento de Fitotecnia. UNALM.
- Chávez M. Sgroppo S. Avanza J. 2004. Isotermas de Sorción de Berenjenas Deshidratadas. [Consultado el 06 de noviembre de 2009]. Formato pdf. Disponibilidad Libre en: <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2004/8-Exactas/E-081.pdf>
- Francisco G. Gordillo A. Prieto J. Gómez C. Román A. 2006). Evaluación de las isotermas de Sorción en Cereales Para Desayuno. [Consultado el 06 de noviembre de 2009]. Formato pdf. Disponibilidad Libre en: http://www.fis.cinvestav.mx/~smcsyv/supvac/19_1/SV1911206.pdf

- Gal S. 1987. The need for, and practical applications of sorption data. London.
- Gálvez A. Aravena E. Mondaca E. 2006. Isotermas de Adsorción en Harina de Maíz (*Zea Mays* L.). [Consultado el 06 de noviembre de 2009]. Formato pdf. Disponibilidad Libre en: <http://www.scielo.br/pdf/cta/v26n4/16.pdf>
- García S. Schmalko M. Tanzariello A. 2007. Isotermas de Adsorción y Cinética de Secado de Ciertas Hortalizas y Aromáticas Cultivadas en Misiones. [Consultado el 06 de noviembre de 2009]. Formato pdf. Disponibilidad Libre en: http://www.inta.gov.ar/ediciones/ria/36_1/07_.pdf
- Geankoplis J. 2006. Procesos de Transporte y Principios de Procesos de Separación. 4ta Ed. Editorial Continental. 1009 p.
- Iglesias H. Chirife J. 1982. Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components. New York: Academic Press.
- Instituto Nacional de Investigación Agraria INIA. 2007. Una Nueva Variedad para la Sierra del Perú. [Consultado el 20 de junio de 2009]. Formato pdf. Disponibilidad libre en: <http://www.inia.gob.pe/webinia/vinia/inia417.pdf>.
- Labuza T. 1984. Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use. Minnesota: Editorial American Association of Cereal Chemists.
- Matos R. 1992. Evaluación de los Modelos Matemáticos de Isotermas de Sorción en Oca (*Oxalis tuberosa* mol.), Olluco (*Ullucus Tuberosus* loz.) y Algunos Derivados. [Tesis de Magister Scientiae en Tecnología de Alimentos]. Lima: UNALM.
- Ocampo A. 2006. Modelo cinético del secado de la pulpa de Mango. [Consultado el 06 de noviembre de 2009]. Formato pdf. Disponibilidad Libre en: <http://revista.eia.edu.co/articulos5/art105.pdf>
- Olivas R. Molina F. Pérez A. Ortega E. 1999. "Development of mathematical model for drying of jalapeño peppers in batch process", Conference in Annual Meeting of American Institute of Chemical Engineers, New York, U.S.A.
- Singh R. Heldman D. 1998. Introducción a la Ingeniería de Alimentos. Zaragoza, España: Editorial Acribia. S.A. 456-458 p.
- Van den Berg C. 1981. Vapor Sorption Isotherms of Foods and Foodstuffs. Journal of American Chemists Society. 19-31 p.
- Vega A. Andrés A. Fito P. 2005. Modelado de la Cinética de Secado del Pimiento Rojo (*Capsicum annuum* L. cv *Lamuyo*). [Consultado el 06 de noviembre de 2009]. Formato pdf. Disponibilidad Libre en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642005000600002&script=sci_arttext