

**DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS DE SORCIÓN DE HUMEDAD EN
HARINA PRECOCIDA DE PLÁTANO VERDE**

(Musa paradisiaca L.)

**DETERMINATION OF GREEN/UNRIPE PLANTAIN PRE-COOKED FLOUR
HUMIDITY SORTION ISOYHERMS**

(Musa paradisiaca L.)

Miguel Ángel Torrealba Piña

MSc.(UNEXPO, UNELLEZ). Laboratorio de Microbiología.

Programa Ciencias del Agro y del Mar.

Vicerrectorado de Infraestructura y Procesos Industriales.

km 4 Carretera Via Manrique, San Carlos, Cojedes, Venezuela 2201.

Email: torrealbap38@hotmail.com

Recibido: 12-01-2007 / Aceptado: 30-03-2007

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es determinar las isotermas de sorción de humedad de la harina precocida de plátano verde, evaluando el comportamiento a cuatro temperaturas diferentes (20, 25, 30 y 35 °C), en un rango de a_w de 0,202 a 0,835. Los datos experimentales de actividad de agua y contenido de humedad, se ajustaron a las ecuaciones propuestas por Ratti *et al.* (1989); Chung y Pfof (1967); GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) y la ecuación BET (Brunauer *et al.*, 1938); utilizando análisis de regresión no lineal y el coeficiente de determinación (R^2) del programa Statistic V-6. De los modelos evaluados fueron Ratti *et al.* (1989) y Chung y Pfof (1967) los que ajustaron mejor las isotermas de sorción; el primero presentó un coeficiente de determinación de 0,991 y 0,996, para todas las temperaturas analizadas y el segundo un coeficiente entre 0,9735 y 0,9876. Se determinó el valor de la monocapa con las ecuaciones de BET (Brunauer-Emmett-Teller, 1938) y GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer, 1984), con mejores resultados con el modelo de BET, cuyos valores se ubicaron entre 0,0243 y 0,0033 g de H₂O/g de sólido. Finalmente se evaluó el calor isostérico de sorción requerido por la harina precocida de plátano verde para alcanzar el equilibrio sorcional, mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron en su forma integrada (Soekarto y Steinberg, 1981), concluyéndose que este calor varía con la temperatura y el contenido de humedad.

Palabras claves: *Actividad de agua, isotermas de sorcion, harina de platano.*

SUMMARY

The objective of the present research is to determine the sorption isotherms of green/unripe plantain pre-cooked flour, and evaluating its behavior at four different temperatures (20, 25, 30 and 35 degrees Centigrades), in a A_w range between 0.202 and 0.835. The A_w experimental data and humidity content adjusted well to the equations proposed by Ratti *et al.* (1989), Chung and Pfoest (1967), GAB (Guggenheim *et al.* 1984), and the BET equation (Brunauer *et al.*, 1938); utilizing Non-Linear Regression Analysis and the Determination Coefficient (R^2) of the Statistics V-6 Program. Out of the evaluated models were Ratti *et al.* (1989) and Chung and Pfoest (1967) the ones that adjusted better the sorption isotherms; the former showed a determination coefficient of 0.991 and 0.996, for all the analyzed temperatures, and the latter showed a coefficient of 0.9735 and 0.9876. The value of the monolayer was determined using the BET equation (Brunauer-Emmett-Teller, 1938) and GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer, 1984) thus obtaining better results with the BET method, whose values were 0.0243 and 0.0033 g H₂O/g solids. Finally, the green/unripe plantain flour Isothermic Sorption Heat was evaluated in order to reach the sorptional equilibrium, by means of the Clausius-Clapeyron equation in its integrated form (Soekarto and Steinberg, 1981), thus concluding that this value varies with temperature and humidity content.

Keywords: *Water activity, sorption isotherms, plantain flour.*

INTRODUCCION

La actividad de agua (a_w) de un producto representa uno de los factores primordiales en la conservación de alimentos, por permitir reducir la posibilidad de que se lleven a cabo diferentes tipos de reacciones bioquímicas y el crecimiento de microorganismos que produzcan alteraciones en el mismo o que sean patógenos (Sandoval *et al.*, 2002), es por ello la presente investigación está orientada a determinar las isotermas de sorción de humedad de la harina de plátano verde, para así disponer de un modelo de predicción que permitirá inferir sobre tiempos de secado, estabilidad o vida de almacenamiento, selección de materiales de empaques, definición de condiciones de almacenamientos, y otros factores que involucran su conservación (Fuentes, 1996).

El objetivo general de la presente investigación es determinar las isotermas de sorción de humedad de la harina precocida de plátano verde, evaluando el comportamiento a cuatro temperaturas diferentes (20, 25, 30 y 35 °C), en un rango de a_w de 0,202 a 0,835. Como objetivos específicos se tienen: a) Ajustar los datos de sorción de humedad de la harina de plátano verde, con los modelos de Ratti *et al.*, (1989); Chung y Pfof (1967); GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) y BET (Brunauer *et al.*, 1938), para la predicción de la a_w del producto. b) Determinar la humedad la humedad crítica de almacenamiento (valor de la monocapa) mediante la ecuación de GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) y BET (Brunauer *et al.*, 1938). c) En caso de no ajustar los datos de sorción de humedad con las ecuaciones de Ratti *et al.* (1989); Chung y Pfof (1967); GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) y BET (Brunauer *et al.*, 1938), desarrollar un modelo matemático que prediga la actividad de agua. d) Evaluar la influencia de la temperatura sobre la actividad de agua en la harina de plátano verde, y determinar el calor isostérico de sorción con la relación de Clausius Clapeyron integrada (Soekarto y Steinberg, 1981).

MATERIALES Y MÉTODOS:

Materia Prima.

Para esta investigación se utilizó harina precocida a partir de plátano verde adquirido en el comercio local. Procesada en el laboratorio de Ingeniería y Tecnología de Alimentos de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales (UNELLEZ), núcleo San Carlos, Estado Cojedes, Venezuela, bajo la metodología propuesta por Murillo (2003). El plátano verde

fue pelado manualmente y luego se sumergió en solución de ácido cítrico 1% por un minuto, a fin de evitar oxidación, luego se procedió a cubiletearlo en "tajadas" de más o menos 1 a 2 milímetros de espesor para posteriormente secarlo en bandejas, con un tratamiento térmico de 40 °C por 48 horas. Se procedió a reducir de tamaño del material seco en un molino de martillo, marca RETSDIETZ, modelo SK1 y malla $\frac{3}{4}$ mm. La harina se colocó en un recipiente plástico grande y sellado herméticamente, para evitar variaciones de la humedad.

Análisis Físico-químico.

A la harina se le hizo análisis proximal de acuerdo con los procedimientos establecidos en las normas de la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN) y de la Association Official of Analysis Chemistry (AOAC). La humedad de la harina se determinó bajo el método de pérdida de peso en estufa a 100 ± 5 °C por 1 hora (A.O.A.C, 1980, No 7003), con el uso de una estufa de vacío. Para determinar proteína cruda se siguió el método Macro Kjeldahl (COVENIN, 1195-80), con el uso del equipo marca LABCONCO. Se cuantificó grasa cruda mediante el método de Soxhlet, realizado por extracción con éter de petróleo, en un equipo marca LABCONCO modelo 35001, de acuerdo con el procedimiento de la A.O.A.C (1980, N° 7.056), utilizando el factor 6.25 para transformar en proteína. Con respecto a las cenizas, se aplicó el procedimiento de la Norma COVENIN 1115-79; A.O.A.C (1980, No 18.025), mediante pérdida de peso de la materia fresca, después de la incineración a 550°C, en una mufla; y para la fibra cruda se aplicó el procedimiento establecido en la Norma COVENIN 1194-79; mientras que el porcentaje total de carbohidratos se obtuvo por diferencia (Fuentes, 1996; Landaeta, 2005).

Determinación de Isotermas de Sorción

La isoterma de sorción se define como la relación entre la actividad de agua (o la humedad relativa del aire circundante) y el contenido de humedad de un material en equilibrio a temperatura constante, la cual se obtiene cuando el proceso de equilibrio parte de una muestra húmeda, y a esta se le permite equilibrarse con la humedad del aire circundante perdiendo humedad, reflejando así la forma como el agua se liga al sistema (Fuentes, 1996). Su importancia para la ciencia de los alimentos se basa en la capacidad para predecir potenciales cambios en la estabilidad de los productos, a la vez de ser útiles para seleccionar empaques e ingredientes por predecir la humedad máxima a permitir durante el almacenamiento (Madigan *et al.*, 2004).

Las isotermas de sorción de la harina de plátano se determinaron evaluando el comportamiento del equilibrio de humedad a cuatro temperaturas diferentes (20, 25, 30 y 35 °C), abarcando un rango de a_w de 0,202 a 0,835 (Landaeta, 2005). Este método consiste en:

- a. Mediante el uso de recipientes de plástico, con capacidad de 250 cc, se logran ambientes de humedad controlada, en los que se obtienen, a partir de diversas soluciones salinas saturadas, microatmósferas de humedad relativa fija a las temperaturas de estudio. Las sales que se usaron para preparar las soluciones fueron las siguientes: Acetato de Potasio

- ($\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$; $a_w = 0,200$), Cloruro de Magnesio (MgCl_2 ; $a_w = 0,327$), Carbonato de Potasio (K_2CO_3 ; $a_w = 0,431$), Nitrato de Magnesio (MgNO_3 ; $a_w = 0,528$), Cloruro de Cobalto (CoCl_2 ; $a_w = 0,649$), Cloruro de sodio (NaCl ; $a_w = 0,752$), Cloruro de potasio (KCl ; $a_w = 0,843$).
- Se pesaron 2 gramos de muestra en pequeños recipientes plásticos y luego se introdujeron en las microatmósferas. Finalmente se tapó herméticamente el recipiente de plástico, para así garantizar el intercambio osmótico entre la muestra de harina y la solución saturada.
 - Las mediciones se efectuaron por triplicado, (21 mediciones), que se lograron colocando los envases sellados en estufa a 20, 25, 30 y 35 °C durante 5 días; suficientes para alcanzar las condiciones de equilibrio. Se desmontó el microambiente y se pesó la muestra; el resultado se expresó como gramos de agua por gramos de materia seca. Inmediatamente se determinó actividad de agua utilizando el equipo DECAGON y se construyeron las isotermas con los datos de a_w obtenidos.

Ajuste de Datos de Sorción de Humedad

Para establecer el ajuste de los datos experimentales, se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2), de los modelos propuestos por Ratti *et al.* (1989); Chung y Pfost (1967); GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) y la ecuación BET (Brunauer *et al.*, 1938), además de los parámetros o coeficientes de cada ecuación.

Modelo de Ratti *et al.*, (1989):

Es una ecuación que permite predecir a_w en diversos alimentos frescos, cuya relación de humedad incluye la dependencia con la temperatura (Fuentes, 1996). El modelo es el siguiente:

$$\ln(a_w) = C_1 \exp(-C_2 X) X^{C_3} + Q_1 \exp(-Q_2 X) X^{Q_3} \ln p \quad (1)$$

donde:

a_w - , es la actividad de agua.

X - , es la humedad en base seca.

p - , es la presión de vapor a la temperatura considerada.

$C_1 - C_2, C_3, Q_1, Q_2, Q_3$, son constantes para cada producto.

Modelo de Chung y Pfost (1967):

Ecuación general para cereales y sus productos. Se expresa de la siguiente manera:

$$m = a + b \ln(-\ln a_w) \quad (2)$$

donde:

m - , es la humedad expresada en base seca.

a_w - , es la actividad de agua.

a - b y , son pendientes e intercepto.

Modelo de Guggenheim Anderson de Boer (GAB, 1984):

Es una extensión de la ecuación de BET (1938), teniendo en cuenta las propiedades modificadas del agua adsorbida en la región multicapas (Kapsalis, 1987), siendo el modelo que mejor ajusta los datos de isotermas de adsorción para la mayoría de los alimentos y muy utilizado para predecir datos de niveles de actividad de agua de aproximadamente 0,9.

$$\frac{Xe}{Xm} = \frac{CKa_w}{(1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w)} \quad (3)$$

$$C = c \exp\left(\frac{Hm - Hn}{RT}\right) \quad (4) \quad , \quad K = k \exp\left(\frac{Hp - Hn}{RT}\right) \quad (5)$$

donde:

CK - , son fracciones de arreglo entrópico.

Hm - , es la entalpía molar de adsorción de la monocapa.

Hn - , es la entalpía de adsorción de la multicapa

Hp - , es la entalpía molar de la evaporación de agua líquida.

Xe - , es el contenido de humedad (gH₂O/ g de sólido).

Xm - , es el contenido de humedad de la monocapa (gH₂O/ g de sólido).

C - K y, son constantes características de cada alimento.

Modelo de BET (Brunauer, Emmett y Teller; 1938):

Modelo desarrollado bajo la consideración de que cada molécula adsorbida en la primera capa es un sitio para la desorción de una molécula en la segunda capa.

$$\frac{a_w}{V(1 - a_w)} = \frac{1}{CV_m} + \frac{(C - 1)}{CV_m} a_w \quad (6)$$

donde:

V - , es el volumen de agua adsorbida en el alimento.

V_m - , es el volumen de la cantidad de agua adsorbida en la monocapa.

C - , es la constante del alimento.

Valor de la Monocapa.

Para determinar el valor de la monocapa se utilizaron los modelos propuestos por Brunauer-Emmett-Teller (BET, 1938) y GAB (1984). Se graficó $a_w/m(1-a_w)$ en el eje de ordenadas y a_w en el eje de abscisas, se obtuvo una recta cuya intersección con el eje de ordenada es $1/m_1C$, y pendiente igual a $(C-1)/m_1C$. Con la ayuda de esta ecuación se pudo determinar m_1 (valor de la monocapa) y la constante C . Para aplicar el modelo de GAB (1984), se escribió la misma como un polinomio de segundo grado, lo que permitió estimar los factores a , b y g aplicando regresión no lineal, y posteriormente determinar m_1 (valor de la monocapa) y los parámetros C y K mediante las relaciones (Barbosa *et al.*, 2000):

$$a_w/m = \alpha(a_w)^2 + \beta a_w + \gamma \quad (7)$$

$$m_1 = \sqrt{-\frac{1}{4\alpha\gamma - \beta^2}} \quad (8) \quad K = \frac{1}{m_1C\gamma} \quad (9)$$

Calor de sorción de humedad.

La energía de sorción, expresada como calor de sorción (Q_s), es la cantidad total de calor por unidad de peso del adsorbente para una cantidad de moles absorbidos en el sistema (Vega Mercado *et al.*, 1994); expresándose también como la diferencia entre el calor isostérico de sorción (Q_{st}) y el calor de condensación del vapor de agua (ΔH_b) (Balaban *et al.*, 1987). Es un factor que involucra al contenido de humedad del producto y su temperatura de operación. Cuando se aumenta la temperatura la mayor sorción de las moléculas toman la energía necesaria para hacer el cambio de líquido a vapor, y en consecuencia se precisa mayor presión para establecer un equilibrio entre el vapor y el líquido (Universidad de La Habana, 2002). Esta variación de la presión de vapor se expresa matemáticamente con la ecuación de Clausius-Clapeyron integrada (Soekarto y Steinberg, 1981), la cual expresa que para la transición de líquidos a vapor P es la presión a la temperatura T , $\Delta H = \Delta H_v$ el calor de vaporización de un peso dado de líquido, y $V_1 = V_l$ el volumen del líquido, mientras que $V_2 = V_g$ es el volumen del mismo pero de vapor.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_v}{T(V_g - V_l)} \quad (10)$$

Si el vapor se comporta esencialmente como un gas ideal, entonces $V_g = RT/P$ y la ecuación anterior se transforma en:

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_v}{(RT)^2} \quad (11)$$

Soekarto y Steinberg (1981), integraron la ecuación de Clausius-Clapeyron, con la cual se puede determinar el calor isostérico neto o energía de enlace de sorción, quedando de la

$$\frac{d(\ln P)}{d(1/T)} = - \frac{Q_{st}}{R} \quad (12)$$

donde:

- P, es la presión, T la temperatura y Q_{st} el calor isostérico de sorción.

La energía de sorción permite estudiar el estado del agua en la superficie de un alimento, involucrando parámetros como entalpía y entropía de sorción, igualmente, se puede expresar como calor de sorción total (Q_{st}) y calor de sorción neto (Q_{sn}), donde el primero es la cantidad de calor por unidad de peso del adsorbente para un número específico de moles de adsorbente en el sistema y el segundo representa el límite de calor total para un adsorbente de moles conocidos (Aguerre et al, 1986).

Análisis Estadístico.

A los datos experimentales de actividad de agua y humedad que se obtuvieron a través de un esquema de tratamiento de tres factores: soluciones saturadas (a_w teóricos) a 7 niveles; temperatura a 4 niveles y harina precocida a 1 nivel; arreglados como un experimento factorial en un diseño completamente aleatorizado, se les aplicó un análisis de supuestos del ANOVA (Análisis of Variance), utilizando el procedimiento univariado del SAS (Statistical Analysis System); y para las respuestas generadas por el modelo factorial, se utilizó el procedimiento ANOVA para las pruebas de significancia F de tratamientos, definiéndose las variables Y_1 = actividad de agua y Y_2 = humedad. Para verificar cuales tratamientos fueron significativos, se utilizó la prueba de comparación de medias LSD (Least Significant Difference) del SAS.

Resultados y Discusión.

Análisis de la Materia Prima.

La harina precocida de plátano verde muestra un contenido de humedad que puede considerarse dentro del rango de alimentos deshidratados, tal como lo muestra el cuadro 1.

Análisis estadístico de los datos experimentales.

De acuerdo a este cuadro, el modelo factorial aplicado para obtener los datos experimentales de humedad y actividad de agua de la harina precocida de plátano verde, muestra un alto nivel de significancia para las variables estudiadas, con un coeficiente de variación inferior a 10 y una correlación superior a 0,90; lo que implica que no existen restricciones para el ajuste de los datos experimentales a las ecuaciones de isoterms de sorción previstas.

Cuadro 1: Composición proximal de la harina de plátano verde (en 100 g)

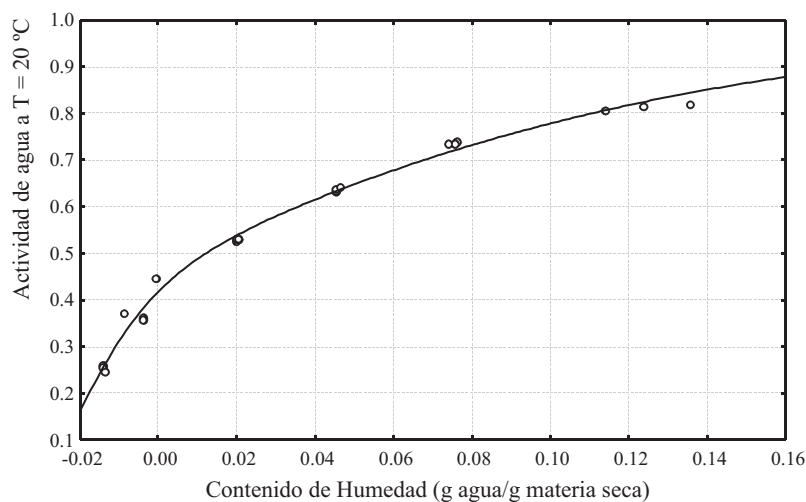
<i>Componente</i>	<i>Valor</i>
Calorías	83,3 por cada 100 g.
Humedad (%)	6,9
Carbohidratos (%)	83,2
Proteína (%)	3,6
Lípidos (%)	0,18
Fibra (g)	9,01 por cada 100 g.
Cenizas (%)	2,3
Magnesio (mg)	36,4 por cada 100 g.
Potasio (mg)	350 por cada 100 g.
Provitamina A (mcg)	18 por cada 100 g.
Vitamina C (mg)	11,5 por cada 100 g.
Ácido fólico (mcg)	20 por cada 100 g.

Fuente: Maldonado et al. (2004)

Ajuste de Datos de Sorción de Humedad de la Harina.

a. Ecuación de Ratti et al (1989):

La evaluación de los datos experimentales de sorción de humedad de la harina de plátano verde, arrojó un ajuste adecuado con esta ecuación, presentando una correlación superior a 0,99 para cada una de las temperaturas experimentadas (20, 25, 30 y 35 °C).



Fuente: Determinaciones propias. Datos Anexo 1. Programa Statistica Versión 6,0

Figura 1. Isotermas de sorción de humedad de harina precocida de plátano verde ajustada a la ecuación de Ratti et al (1989), a la temperatura de 20 °C.

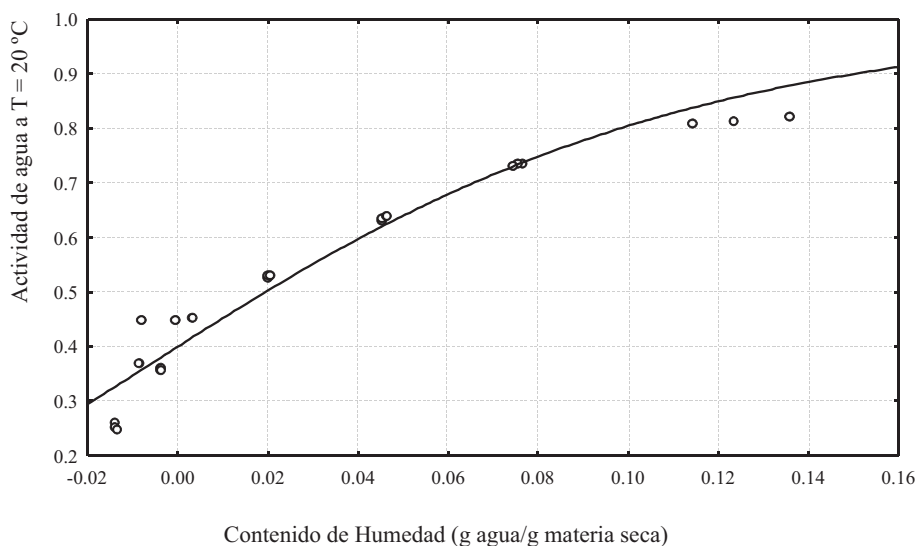
Cuadro 2: Análisis de Varianza para las variables A y B

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>G.L.</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F-radio</i>	<i>F-valor</i>
EFECTOS:					
A: Humedad	2,83586	79	0,035897	143588,10	0,0021
B: Temperatura	0,00000225	3	0,0000007	3,00	0,3901
RESIDUAL:	0,0000007	1	0,0000007		
Coefficiente de variación:	A = 0,91 y B = 0,00045				
Correlación (R ²):	A = 0,985 y B = 0,982				

Fuente: Determinaciones con software estadístico Statgraphics Plus. Versión 5.1 (2001)

b. Ecuación de Chung y Pfof (1967):

Los datos de sorción de humedad del producto estudiado se ajustaron satisfactoriamente a esta ecuación, a las temperaturas experimentadas (20, 25, 30 y 35 °C), con coeficientes de correlación entre 0,9735 y 0,9876, con un mejor ajuste a 25 °C ($R^2 = 0,9876$).

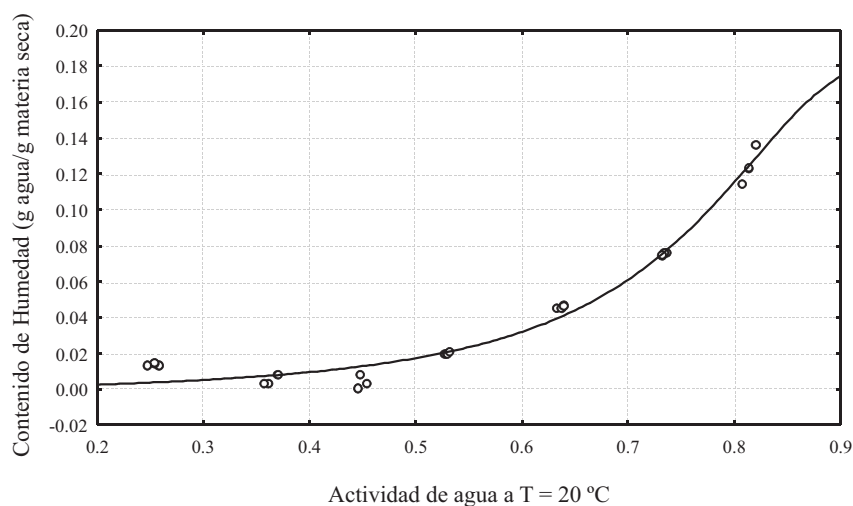


Fuente: Determinaciones propias. Datos Anexo 1. Programa Statistica Versión 6,0

Figura 2. Isotermas de sorción de humedad de harina precocida de plátano verde ajustada a la ecuación de Chung y Pfof (1967), a la temperatura de 20 °C.

c. Ecuación de Guggenheim Anderson de Boer (GAB, 1984):

Este modelo es una extensión de la ecuación de BET (1938), ajustando satisfactoriamente a los datos de sorción de humedad de esta harina, debido a que muestra coeficientes de correlación entre 0,9587 y 0,9728 para las temperaturas estudiadas; con un mayor ajuste a la temperatura de 25 °C. Muchos investigadores han evaluado datos de sorción de humedad con esta ecuación, llegando a la conclusión de que ajusta bien a diferentes temperaturas, tanto en productos de deshidratados como los de humedad intermedia.



Fuente: Determinaciones propias. Datos Anexo 1. Programa Statistica Versión 6,0

Figura 3. Isotermas de sorción de humedad de harina precocida de plátano verde ajustada a la ecuación de GAB, 1984), a la temperatura de 20 °C.

d. Ecuación de Brunauer Emmett - Teller (1938):

Con este modelo, los datos de sorción de humedad de la harina precocida de plátano verde no se ajustan satisfactoriamente, debido a que los coeficientes de relación lineal (R^2) son muy bajos, con valores entre 0,173 y 0,401 para las temperaturas experimentadas; además, los valores de la monocapa (m_1), definida por Wolf *et al* (1972) como la cantidad de agua disponible, capaz de interactuar con todos los sitios de adsorción disponibles en un material seco, resultaron muy bajos con valores entre 0,0033 y 0,0243, lo que especifica que hay una dispersión significativa de los datos con el modelo.

Valor de la monocapa.

El valor de la monocapa se ve afectada por la influencia de la temperatura, donde a bajas temperaturas hay mayor disponibilidad de agua que pueda interactuar con todos los sitios de adsorción de la sorción seca del alimento y que influye en la velocidad de las reacciones químicas del mismo. Es un valor inferior a la actividad de agua del alimento, por lo que esta harina precocida es un producto deshidratado, cuya tasa de deterioro es baja.

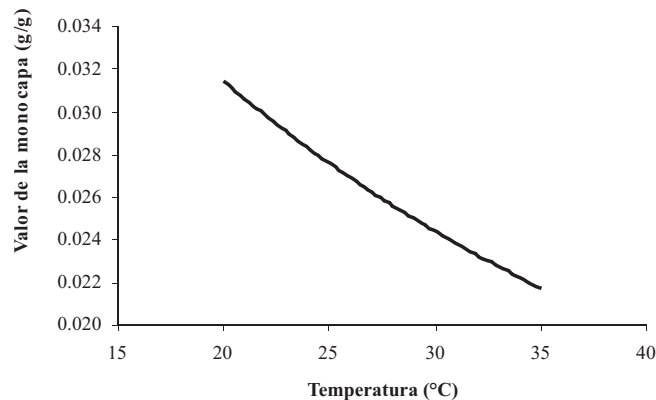
Cuadro 3: Parámetros de la ecuación de BET (1938) para las isotermas de sorción de humedad de la harina precocida de plátano verde a diferentes temperaturas.

<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Pendiente</i> (<i>m</i>)	<i>Intercepto</i> (<i>b</i>)	<i>C</i>	<i>m₁</i> (g/g)	R ²
20	36,1	50,1	8,21	0,0243	0,173
25	19,9	50,3	1,39	0,0143	0,201
30	38,5	57,1	1,67	0,0104	0,401
35	71,54	22,4	4,21	0,0033	0,368

Fuente: Determinaciones propias, Programa Statistica Versión 6,0

Calor de sorción.

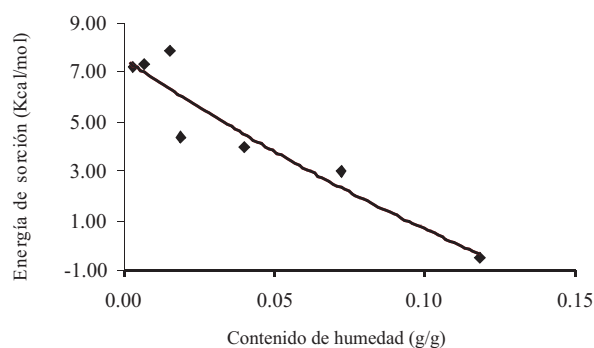
La energía de sorción varía con la temperatura y el contenido de humedad, donde los valores más altos de HB se corresponden con los contenidos de humedad y temperaturas bajas, lo que indica que el efecto de la temperatura hace que varíe la actividad de agua y la energía de enlace de las moléculas de agua.



Fuente: Determinaciones propias, datos Cuadro 16. Microsoft Excel 2003.

Figura 4. Variaciones de la monocapa de los datos de sorción de humedad de la harina precocida de plátano verde con respecto a la temperatura ajustada a la ecuación de GAB (1984).

Este calor se mantiene constante hasta que queda cubierta la monocapa, por lo que decrece repentinamente (Labuza *et al*, 1985); es decir, que para bajos contenidos de humedad este calor es mayor y que disminuye gradualmente a medida que se incrementa la temperatura, indicando el cambio gradual de la monocapa; siendo la condensación capilar la razón principal del aumento del contenido de agua a valores altos de actividad de agua. Por otro lado, todos los cambios ocurridos en la harina precocida de yuca por efecto de la temperatura, y que tienen influencia sobre la energía de sorción, ocurren durante el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio sorcional (Fuentes, 1996; Landaeta, 2005).



Fuente: Determinaciones propias, Microsoft Excel 2003

Figura 5. Variación de la energía de sorción de humedad de la harina precocida de plátano verde a temperatura promedio de 22,5 °C.

Conclusiones y recomendaciones:

De acuerdo a la evaluación de los datos experimentales de sorción de humedad de la harina precocida de plátano verde con los diferentes modelos propuestos para la predicción de humedad, tales como: Ratti *et al* (1989); Chung y Pfof (1967); GAB (1984) y BET (1938), los que arrojaron mejores ajustes fueron los dos primeros mencionados, con coeficientes de determinación superiores a 0,99; lo que indica que ambos modelos matemáticos proporcionan una gran utilidad en la determinación de isotermas de sorción de productos deshidratados con rangos de humedad comprendidos entre 0,2 y 0,9 g de H₂O/g de sólido. Por otro lado, es recomendable que toda empresa manufacturera de alimentos, conozca las isotermas de sorción de humedad de cada uno de sus productos y de las materias primas utilizadas, para así reducir principalmente pérdidas de almacenamiento, tanto de insumos deshidratados como de productos finales de baja humedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguerre, R.; Suárez, C. y Viollaz, P. E. (1986). "Enthalpy entropy compensation in sorption phenomena: Application to the prediction of the effect of temperature on foods isotherms". *J. Food Sci.* 51 (6): 1547-1549.
- A. O. A. C. (1980). "Official Methods of Analysis". Association of Official Analytical Chemists. 16th ed. Arlington Va. U.S.A.
- Balaban, M.O.; Zuritz, C.A.; Singh, R.P. y Hayacana, K. (1987). "Estimation of heat of moisture sorption and improved criteria for evaluating moisture sorption equation for foods". *J. Food Eng.* 10 (1): 53-70.
- Barbosa, G. V. y Vega H. (2000). "Deshidratación de alimentos". Editorial Acribia, S.A. Zaragoza. España.
- Brunauer, S.; Emmett, P.H. y Teller, E. (1938). "Adsorption of gases in multimolecular layers". *J. Am. Chem. Soc.* 60 (1): 309-319.

- COVENIN (1979). Norma Venezolana de Alimentos. "Alimentos para Animales. Determinación de Cenizas", Método N° 1115-79. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas Venezuela.
- COVENIN (1979). Norma Venezolana de Alimentos "Determinación de fibra cruda". Método 1194-79. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas Venezuela
- COVENIN (1980). Norma Venezolana de Alimentos. "Determinación de nitrógeno". Método Kjeldahl N° 1195-80. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas Venezuela.
- Chung, D.S. y Pfof, H.B. (1967). "Adsorption y desorption of water vapor by cereal grain and their products". Part II. Development of the general isotherm equation. *Trans. ASAE*. 10 (3): 552-555.
- Fuentes, A. (1996). "Predicción de la actividad de agua en harinas precocidas de quinchoncho (*Cajanus cajan* L. Millsp) y habas (*Canavalia ensiformis*) y sus mezclas". Trabajo de grado maestría. UDO. Venezuela.
- Guggenheim, H.; De Boer, J.H. y Anderson, R. (1984). "Description of water activity of food for engineering purposes by mean of the G.A.B. model of sorption". In Van den Berg, C. 1980. *Engineering and foods. Elsevier Applied Science*. London. 1:311-314.
- Kapsalis, J. G. (1987). "Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms". In *Water Activity: Theory and Applications in Food*. L.A. Rockland and L. R. Beuchat (Ed.), p. 173-213. Marcel Dekker Inc. New York, USA.
- Labuza, T. P.; Kaanane, A y J, Chen (1985). "Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity on two dehydrated foods". *J. Food Sci.* 50(2): 385-391.
- Landaeta, J. (2005). "Características de sorción de humedad de la harina precocida de batata (*Ipomoea batata* spp)". Trabajo de Grado Maestría. UNELLEZ. Venezuela.
- Madigan, M.; Martinko, J. y J, Parker. (2004). "Biología de los Microorganismos". 10^{ma} edición. Pearson Educación, S.A. Madrid España.
- Maldonado, R. y Pacheco, E. (2004). "Elaboración de galletas con una mezcla de harina de trigo y de plátano verde". Trabajo de Investigación. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía Maracay Venezuela.
- Murillo, O. (2003). "Posibilidades de industrialización del plátano". CITA-UCR. Dirección de Mercadeo y Agroindustria. San José, Costa Rica.
- Ratti, C.; Crapiste, G. H. y Rotstein, E. (1989). "A new water sorption equilibrium expression for solid foods based on thermodynamic considerations". *J. Food Sci.* 54(3): 738-747.
- Sandoval, A; Barreiro, J.; Tovar, X. y Angueira, M. (2002). "Características de sorción del cacao fermentado en polvo (*Theobroma cacao*)". *Rev. Téc. Ing. Universidad del Zulia*. 25(1): 1-7.
- Soekarto, S. T. y Steinberg, M. P. (1981). "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, p 265. Academic Press. N. Y.
- Universidad de La Habana (2002). Calor de adsorción y cambios de energía [Página web] Disponible: <http://www.uh.cu.com> (Consulta: 2005, Octubre 26).
- Vega-Mercado, H y Barbosa-Cánovas, G. (1994). "Prediction of water activity in foods systems: A review of theoretical models". *Rev. Esp. Cienc. Tecnol. Aliment.*
- Wolf, M.; Walter, J. E y Kapsalis, J. G (1972). "Water vapor sorption hysteresis in dehydrated food. *J. Agr. Food Chem.* 20(5): 1073.