

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**DEPARTAMENTO ACADEMICO DE CIENCIAS, TECNOLOGIA E INGENIERIA DE ALIMENTOS**



**"PREDICCIÓN DE GANANCIA DE HUMEDAD EN HARINA DE  
PLÁTANO (*Musa paradisiaca*, variedad *inguri*) EMPACADO,  
MEDIANTE MODELOS MATEMÁTICOS DETERMINISTAS"**

**TESIS**

Para optar el título de:

**INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Presentado por:

**LETICIA ANGELICA ALVAREZ BARDALES**

**TINGO MARIA - PERU**

**- 2001 -**

## DEDICATORIA

A mis amados hijos:

Angela Fabiola y

Jorge Salvador, por

su amor y sacrificio.

A mis queridos padres:

Pacífico Alvarez y Leticia Angélica.

Con infinita gratitud, que con amor  
y sacrificio me guiaron desde mi  
infancia estimulándome con sus  
sabios consejos al amor, trabajo y  
estudio.

A mi esposo:

Jorge Rengifo Vásquez; por su desinteresado apoyo moral y gran comprensión.

A mis hermanos:

Victoria, Simona, Rosaura, Celia, Pacífico y Lorena; por su apoyo moral y sublime comprensión.

## **AGRADECIMIENTO**

Al Ing° Luis Alberto Condezo Hoyos, amigo y patrocinador del presente trabajo de investigación, por su invaluable apoyo.

Al Ing° Jaime Basilio Atencio, Co-patrocinador del presente trabajo.

A Carlos Salazar Salazar, por su colaboración en el presente trabajo de investigación.

A la Bach. Felicitas Pajuelo Ticeran, por su colaboración y aliento en la ejecución del presente trabajo de investigación.

Al Sr. Luis Gutiérrez, por su apoyo en la impresión del presente trabajo de investigación.

A la Ing°. Yolanda Ramírez Trujillo, por su orientación y apoyo en el trabajo de investigación.

Al Sr. Quinto Estelo Celestino, por el apoyo brindado en la ejecución del presente trabajo de investigación.

A los docentes y todas las personas que de una u otra forma contribuyeron a la culminación de mi carrera profesional.

## INDICE GENERAL

	Pag.
<b>RESUMEN</b>	
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISION DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
A. Aspectos generales de la harina de plátano.....	3
1. Definición.....	3
2. Composición química.....	3
3. Tecnología de obtención.....	3
B. Agua en los alimentos.....	6
1. Actividad de agua.....	6
2. Isotermas de sorción de humedad.....	8
3. Modelos matemáticos de ajuste.....	22
C. Modelamiento de la cinética de ganancia de humedad en alimentos deshidratados.....	22
1. Aspectos generales.....	22
2. Cinética de ganancia de humedad.....	24
3. Modelamiento de la cinética de ganancia de humedad.....	26
<b>III. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>29</b>
A. Lugar y fecha de ejecución.....	29
B. Materiales y Equipos.....	29
1. Materia prima.....	29
2. Materiales, reactivos y equipos.....	29
C. Métodos de análisis.....	31

1. Análisis químico proximal.....	31
2. Análisis granulométrico.....	32
3. Determinación de las isotermas de adsorción.....	32
4. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua del empaque.....	32
D. Metodología.....	32
1. Caracterización de la harina de plátano.....	32
2. Determinación de los parámetros y bondad de ajuste de los modelos matemáticos de sorción de humedad.....	34
3. Variación experimental de humedad de la harina de plátano empacada.....	34
4. Predicción de la ganancia de humedad en harina de plátano empacada, mediante modelos matemáticos deterministas.....	35
5. Validación de los modelos matemáticos deterministas de predicción de ganancia de humedad en harina de plátano empacada.....	37
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>39</b>
A. Caracterización de la harina de plátano.....	39
1. Química proximal.....	39
2. Granulométrica.....	40
3. De la isoterma de adsorción de humedad.....	41
B. Determinación de los parámetros y bondad de ajuste de los modelos matemáticos de sorción de humedad.....	43

C. Variación experimental de humedad de la harina de plátano empacada.....	47
D. Predicción de la ganancia de humedad en harina de plátano empacada, mediante modelos matemáticos deterministas.....	51
1. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua del empaque.....	51
2. Implementación de los modelos matemáticos deterministas de predicción de ganancia de humedad en harina de plátano.....	51
3. Simulación de la ganancia de humedad en harina de plátano .....	55
E. Validación de los modelos matemáticos deterministas de predicción de ganancia de humedad en harina de plátano empacada.....	60
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>63</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>64</b>
<b>VIII. ANEXOS.....</b>	<b>69</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pag.</b>
1. Diagrama de bloques para el procesamiento de harina de plátano.....	5
2. Isotermas de sorción de humedad de alimentos.....	8
3. Zonas de la isoterma de sorción de humedad de alimentos.....	10
4. Tipos de isotermas de sorción de humedad.....	12
5. Esquema de un producto contenido en un envase flexible.....	24
6. Etapas para la predicción de ganancia de humedad en harina de plátano empacado, mediante modelos matemáticos.....	33
7. Diagrama de flujo del algoritmo del programa para predicción de ganancia de humedad en harina de plátano empacada.....	38
8. Curva de distribución de tamaños de la harina de plátano.....	41
9. Isoterma de adsorción de la harina de plátano a 29.2°C.....	43
10. Variación experimental de la humedad en base seca de la harina de plátano empacada, sometida a la condición A y B.....	50
11. Variación de la humedad en base seca experimental y estimado por los modelos matemáticos, de la harina de plátano empacada, sometida a la condición A.....	58
12. Variación de la humedad en base seca experimental y estimado por los modelos matemáticos, de la harina de plátano empacada, sometida a la condición B.....	59

## INDICE DE CUADROS

	Pag.
1. Composición química de la harina de plátano.....	4
2. Modelos matemáticos de sorción de humedad.....	23
3. Condiciones experimentales sometida a la harina de plátano empacada a 29,2 °C.....	35
4. Composición química proximal de la harina de plátano.....	39
5. Parámetros del modelo matemático para el análisis granulométrico de la harina de plátano.....	40
6. Humedad de equilibrio de la harina de plátano.....	42
7. Parámetros de los modelos de sorción de humedad.....	44
8. Parámetros de bondad de ajuste de los modelos de sorción de humedad.....	45
9. Condiciones experimentales para determinar la variación de ganancia de humedad en harina de plátano empacada.....	47
10. Variación de la humedad en base seca de la harina de plátano, sometida a la condición A.....	48
11. Variación de la humedad en base seca de la harina de plátano, sometida a la condición B.....	49
12. Permeabilidad al vapor de agua del empaque.....	51
13. Valores de tiempos predichos por los modelos matemáticos, para la condición A.....	56
14. Valores de tiempos predichos por los modelos matemáticos, para la condición B.....	57

15. Comparación t-estudent de los tiempos experimentales

y los predichos por los modelos matemáticos..... 61

**SIMBOLOS USADOS EN LA IMPLEMENTACION DE LOS MODELOS  
MATEMÁTICOS DETERMINISTAS**

$A_w$	:	Actividad de agua.
$A, B, S, t, M_o, K, C, b, l$	:	Parámetros de los modelos de sorción de humedad
$M$	:	% de Humedad de equilibrio en base seca (g agua/g ms).
$dw/d\theta$	:	Velocidad de transporte de agua, expresada en gramos de agua ganada o perdida por día.
$dM/d\theta$	:	velocidad de cambio del porcentaje de humedad en base seca.
$K_w$	:	Permeabilidad del empaque al vapor de agua, en g de agua/día.m <sup>2</sup> .mmHg
$A$	:	Area de exposición del empaque expuesto al medio, en m <sup>2</sup> .
$P_{V_{ext}}$	:	Presión de vapor de agua del medio ambiente, en mmHg.
$P_{V_{int}}$	:	Presión de vapor de agua del alimento, dependiente de la actividad de agua, en mmHg.
$ms$	:	Materia seca del producto empacado
$w$	:	Peso del alimento.
$P_o$	:	Presión de vapor de agua pura a la

temperatura de almacenamiento

$A_{w_i}$  : Actividad de agua del alimento con respecto a la humedad relativa (HR) interna del alimento (M)

$A_{w_e}$  : Actividad de agua del alimento sin empacar, con respecto a la HR del medio ambiente ( $M_e$ ), calculado mediante la isoterma de adsorción

$M_i$  : % Humedad en base seca inicial

$M_f$  : % Humedad en base seca final

$M_e$  : Humedad en base seca del alimento a la humedad relativa de almacenamiento, calculado mediante la isoterma de sorción

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en la Universidad Nacional Agraria de la Selva; desarrollándose en cinco etapas. La primera etapa consistió en la caracterización de la harina de plátano (determinación química proximal, granulométrica e isotermas de adsorción de humedad a 29,2 °C). La segunda etapa consistió en la determinación de los parámetros y bondad de ajuste de los modelos matemáticos de sorción de humedad, siendo los modelos Oswin, Smith, G.A.B y Kuhn los que mejor ajustaron los datos de humedad de equilibrio en orden decreciente del % RSM (0,73-5,2%). En la tercera etapa se determinó la variación experimental de humedad de la harina de plátano, a dos condiciones experimentales (80,6888 y 92,4187% de humedad relativa) y a 29,2 °C durante 30 días. En la cuarta etapa, predicción de la ganancia de humedad de la harina de plátano mediante modelos matemáticos, se determinó la permeabilidad al vapor de agua del empaque (0,1757 y 0,2521 g agua/día.m<sup>2</sup>mmHg); se implementaron los modelos matemáticos de predicción de ganancia de humedad (M.P.G.H), considerando los modelos de sorción con mejor bondad de ajuste y la ecuación de transferencia de agua en alimentos empacados y; la simulación de ganancia de humedad de la harina de plátano empacada, desarrollándose un programa computarizado de simulación en entorno Visual Basic para Windows que predice la ganancia de humedad estimando el tiempo necesario para alcanzar un determinado nivel de humedad experimental a dos condiciones de alimento-empaque-entorno (humedad inicial en base húmeda de la harina de plátano = 7,01; peso del producto = 4,0071 y 4,0128 g; temperatura =29,2 °C; Humedad relativa =

92,4187 y 80,6888%, permeabilidad al vapor de agua del empaque en g agua/día.m<sup>2</sup>mmHg = 0,2521 y 0,1757; área de exposición = 0,00717 y 0,00714 m<sup>2</sup>). La quinta etapa consistió en la validación de los modelos matemáticos de predicción de ganancia de humedad en harina de plátano empacada, donde los valores del tiempo experimental y estimada fueron sometidos a la prueba t-student, resultando con mejor bondad de ajuste los modelos matemáticos deterministas Oswin, Smith, G.A.B. y Kuhn.

## SUMMARY

The present research one carries out in the University "Universidad Nacional Agraria de la Selva, Peru"; being developed in five stages: The first stage consisted on the characterization of the banana flour (determination chemical proximal, granulometric and isotherm of absorption of humidity to 29,2 °C). The second stage consisted on the determination of the parameters and kindness of adjustment of the mathematical models of absorption of humidity, being the model Oswin, Smith, G.A.B. and Kuhn those that better they adjusted the data of balance humidity in falling order of the % RSM (0,73-5,2%). In the third stage you determines the experimental variation of humidity of the banana flour, to two experimental conditions (80, 6888 and 92, 4187% of relative humidity) and to 29,2 °C during 30 days. In the fourth stage, prediction of the gain of humidity of the banana flour by means of mathematical models, you determine the permeability to the vapour of water of the packing (0,1757 and 0,2521 g water/day. m<sup>2</sup>.mmHg); the mathematical models of prediction of gain of humidity were implemented (M.P.G.H), considering the absorption models with better adjustment kindness and the equation of transfer of water in packed foods and; the simulation of gain of humidity of the packed banana flour, being developed an on-line program of simulation in environment Visual Basic for Windows that predicts the estimated gain of humidity the necessary time to reach a certain level of humidity estimating the necessary

time to reach a certain level of humidity estimating the necessary time to reach a certain level of experimental humidity to two food-packing-environment conditions (initial humidity in humid base of the banana flour=7,01; product weigh=4,0071 and 4,0128 g; temperature=29,2 °C, relative Humidity=92,4187 and 80,6888%, permeability to the vapour of water of the packing in g water/day. m<sup>2</sup>.mmHg=0,2521 and 0,1757; exhibition area=0,00714 m<sup>2</sup>). The fifth stage consisted on the validation of the mathematical models of prediction of gain of humidity in packed banana flour, where the values of the experimental and estimation time were subjected to the test t-student, being with better adjustment kindness the models mathematical determinists Oswin, Smith, G.A.B. and Kuhn.

## I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de un producto alimenticio depende de cuatro factores principales: formulación, procesamiento, empaçado y condiciones de almacenamiento, para éste último factor, es importante conocer la cinética de pérdida de calidad a fin de poder realizar predicciones de vida útil.

El periodo de vida útil de los alimentos procesados depende de factores extrínsecos, tales como condiciones de almacenamiento y de factores intrínsecos, definidos por su composición química. Ambos factores se conjugan para definir el modo y la cinética de deterioro, el mismo que provocan alteraciones físicas, químicas, fisicoquímicas, enzimáticas o microbiológicas.

La harina de plátano es un producto deshidratado que se caracteriza por presentar un contenido de humedad inferior al 14% y elevada higroscopicidad; por lo que el factor de calidad que define su vida útil está relacionada con la ganancia de humedad, fenómeno que ocasiona modificaciones en sus características físicas y en el peor de los casos, proliferación microbiana. En este contexto, es necesario como primera etapa del estudio científico de su vida útil, conocer cual es la cinética de ganancia de humedad.

El presente trabajo de investigación tuvo una duración de 08 meses, del 01 de Octubre del 2000 al 30 de Mayo del 2001, en el laboratorio de Análisis de Alimentos de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en la ciudad de Tingo María.

Los objetivos del presente trabajo de investigación fueron:

- Implementar modelos matemáticos de predicción de ganancia de humedad, en harina de plátano empacada.
- Predecir la ganancia de humedad en harina de plátano empacada, mediante modelos matemáticos deterministas.
- Validar los modelos matemáticos deterministas de predicción de ganancia de humedad en harina de plátano empacada.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **A. ASPECTOS GENERALES DE LA HARINA DE PLATANO**

#### **1. Definición**

La harina de plátano, es un producto de buen sabor y nutritivo, obtenido por deshidratación y molienda del plátano verde (Soto, 1985).

#### **2. Composición Química**

En el Cuadro 1, se muestra la composición química de la harina de plátano (Collazos, 1993).

#### **3. Tecnología de Obtención**

Los plátanos deben lavarse, pelarse y rebanarse, luego exponerse a una atmósfera de dióxido de azufre (con el objeto de evitar cambios en el color y sabor), después se secan hasta una humedad del 8%, se muelen, se tamizan y se envasan (Soto, 1985 ).

El pelado se facilitará realizando un calentado a 80°C por 5 minutos; además previo al lavado debe realizarse una selección-clasificación y separación de tallos y dedos (Flores, 1988).

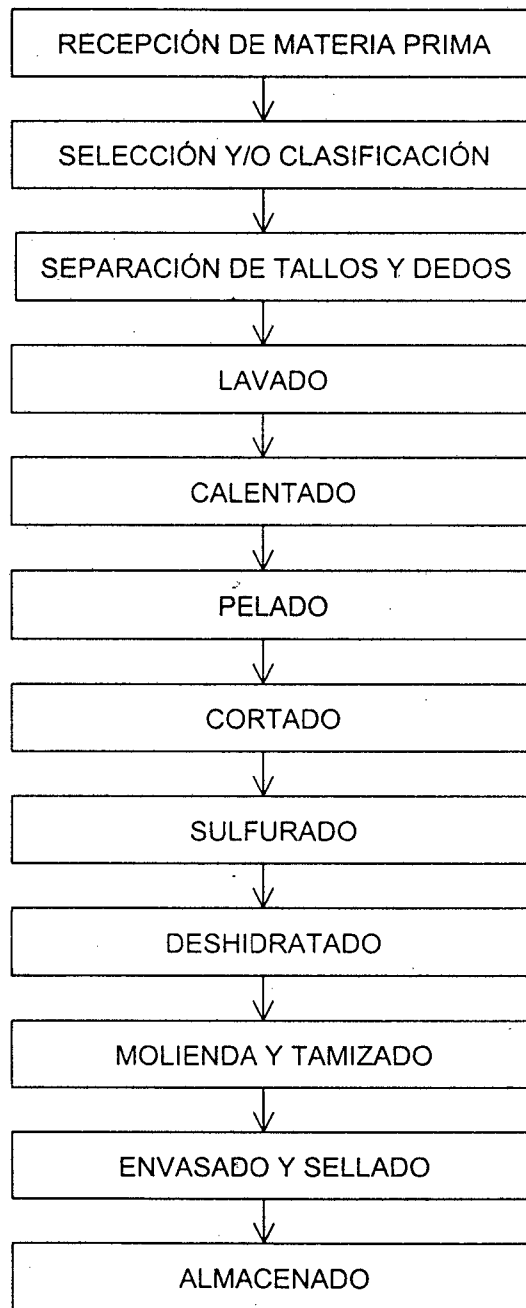
**Cuadro 1.** Composición química de la harina de plátano (100 g de parte comestible).

Componente	Cantidad
Humedad	14,90 g
Proteína	3,10 g
Grasa	0,40 g
Carbohidratos	78,50 g
Fibra	1,10 g
Ceniza	2,00 g
Calcio	10.00 mg
Fósforo	104.00 mg
Hierro	3.90 mg

En el proceso de sulfurado, el plátano se sumerge en una solución de bisulfito o sulfato de sodio al 3%, considerando ser más efectiva por penetrar al interior de la fruta (Hurtado, 1986).

La estabilidad de productos deshidratados, en gran medida es garantizada por el empaque, que lo protege de la humedad, acción microbiana y ciertas reacciones fotoquímicas (Manley, 1989).

La Figura 1, muestra el diagrama de bloques de las operaciones para la obtención de harina de plátano (Flores, 1988).



**Figura 1.** Diagrama de bloques para el procesamiento de harina de plátano.

## B. AGUA EN LOS ALIMENTOS

### 1. Actividad de agua.

#### a. Definición

La actividad de agua es una forma de medición del grado de interacción de las moléculas de agua y los constituyentes no acuosos presentes en el alimento (Badui, 1993 y Fennema, 1993).

Fennema (1993), menciona que la actividad de agua, definida por Lewis tiene la siguiente expresión matemática:

$$A_w = f / f_o$$

Donde:

$A_w$  : Actividad de agua

$f$  : Fugacidad del agua en el alimento.

$f_o$  : Fugacidad del agua pura.

A presiones bajas  $f/f_o$ , es aproximadamente igual a  $p/p_o$ , con un error menor al 1%; por lo que la expresión queda:

$$A_w = p / p_o$$

Donde:

$p$  : Presión de vapor de agua en el alimento.

$p_o$  : Presión de vapor de agua pura.

La actividad de agua es un parámetro que controla parcialmente la estabilidad de los alimentos, dado que el pH, concentración de oxígeno, movilidad y tipo de soluto también influyen en la velocidad de degradación del alimento (Fennema, 1993).

**b. Relación con la estabilidad del alimento**

Torres (1991), manifiesta que las reacciones de deterioro que controlan la estabilidad de un alimento pueden ser de naturaleza:

- 1) Microbiológica, que induce a cambios químicos y organolépticos.
- 2) Químicas, como la oxidación, que genera modificaciones organolépticas y pérdida de nutrientes.
- 3) Bioquímicas, que incluye reacciones enzimáticas, que modifican el color y el valor nutritivo.

La velocidad de las reacciones antes descritas es controlada en gran medida por el valor de actividad de agua (Fennema, 1993).

Los métodos más antiguos de conservación de alimentos, se basan en la reducción física del contenido de humedad (productos deshidratados) y en su control fisicoquímico (productos salados y azucarados); en ambos casos, la actividad de agua es reducida hasta niveles que minimizan la actividad microbiológica (Torres, 1991).

## 2. Isotermas de sorción de humedad en alimentos

### a. Definición

Las isotermas de sorción son representaciones que interrelacionan el contenido de humedad en el equilibrio de un material (expresado en masa de agua por unidad de materia seca) con su actividad de agua, a temperatura constante. Las curvas de isotermas de sorción pueden ser obtenidas por adición de agua (adsorción o resorción) a una muestra seca y por pérdida de agua (desorción), tal como se observa en la figura 2 (Fennema, 1993 y Badui, 1993).

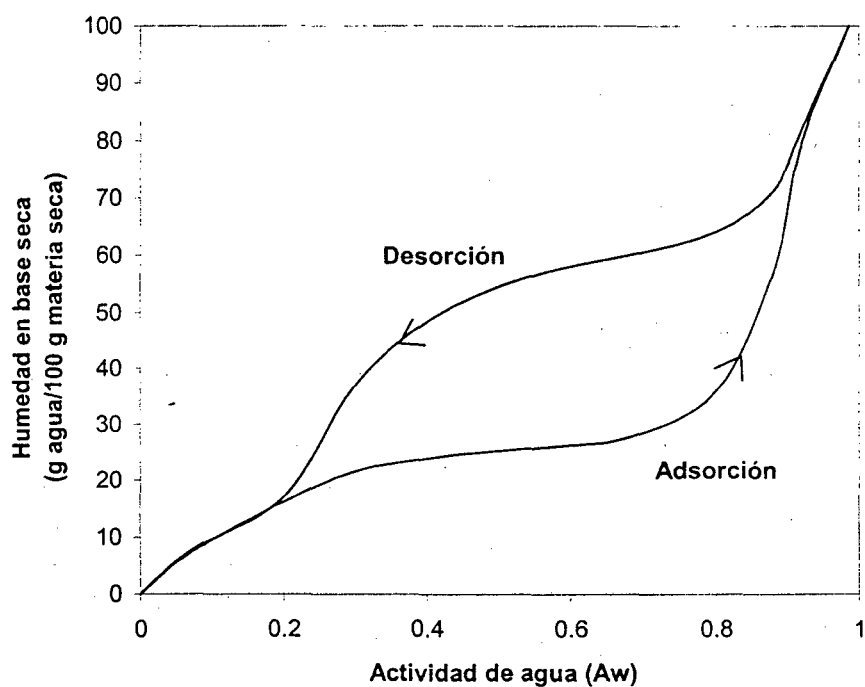


Figura 2. Isotermas de sorción de humedad de alimentos

La isoterma de sorción es la curva que indica, en el equilibrio y para una temperatura determinada, la cantidad de agua retenida por un alimento en función de la humedad relativa de la atmósfera que le rodea (Cheftel *et al*, 1980).

#### **b. Zonas**

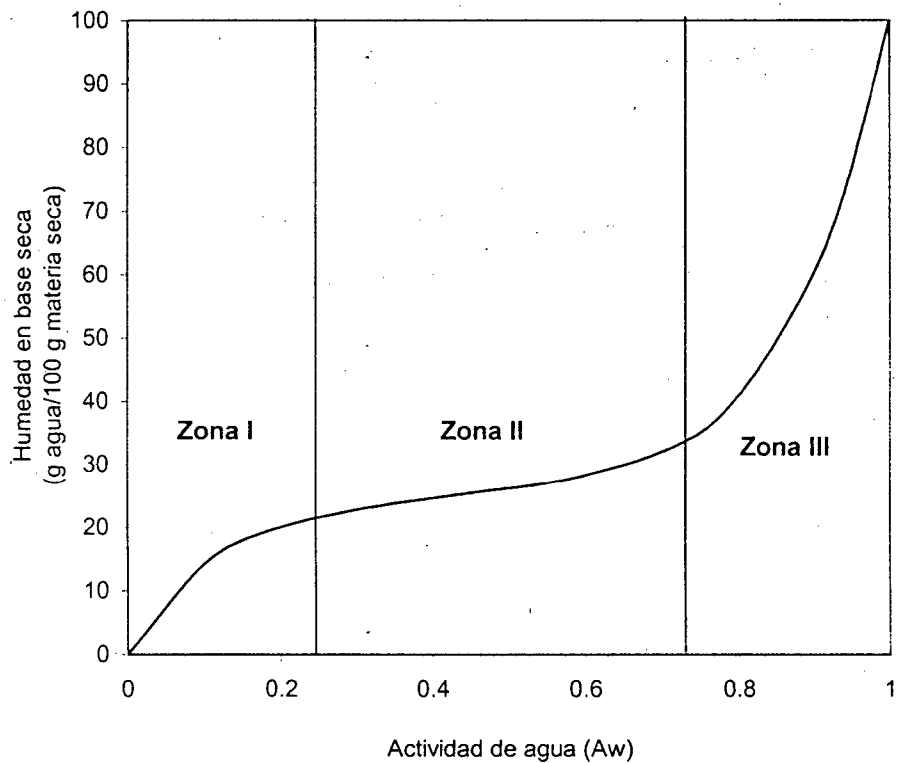
La Figura 3, muestra las zonas de una isoterma de sorción de humedad de alimentos (Troller y Christian, 1978).

##### **1) Zona I: Agua fuertemente absorbida e inmóvil**

Corresponde a valores de 0 a 0,25 unidades de actividad de agua. En esta región de la isoterma el agua está fuertemente absorbida a sitios polares  $\text{NH}_2^+$  y  $\text{COO}^-$  de las proteínas y a los grupos  $\text{OH}^-$  de los almidones, mediante interacción agua-ion o agua-dipolo. La humedad más alta de la zona I, corresponde al valor de "monocapa" del alimento (Fennema, 1993).

El contenido de agua en monocapa para alimentos es menor de 10 g agua/100 g de materia seca. La energía de adsorción del agua de esta capa monomolecular es del orden de 1 a 15 cal/mol, lo que explica que el agua de esta capa sea difícil de extraer (Labuza *et al.*, 1985 citado por Liendo, 1993).

Al nivel de monocapa, las velocidades de reacciones de deterioro son mínimas, y frecuentemente está relacionado con  $A_w$  de 0,2 - 0,4 (Bell y Labuza, 2000).



**Figura 3.** Zonas de la isoterma de sorción de humedad de alimentos.

## 2) Zona II: Agua débilmente ligada

Esta región abarca el rango de actividad de agua de 0,25 a 0,75 unidades (Rockland y Nishi, 1980 citado por Liendo, 1993).

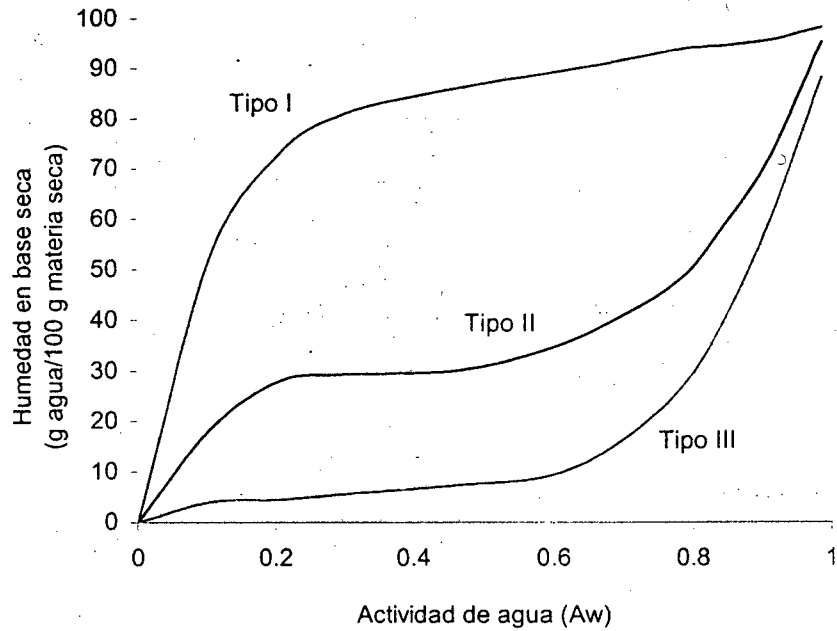
En esta zona el agua es adsorbida en multicapas y en microcapilares sobre la capa mono-molecular, predominando enlaces puentes de hidrógeno, agua-soluto, agua-agua; esta agua, representa la mayor parte de la esfera de hidratación de los constituyentes solubles (proteínas, sales, etc) (Badui, 1993).

### **3) Zona III : Agua en capilares y agua libre**

En esta región el agua de los alimentos se encuentra en macrocapilares, está menos ligada, más móvil molecularmente, fácil de congelar y evaporar, y se designa como agua de la fase masiva, disponible para que ocurra las reacciones de deterioro. Asimismo menciona que el agua de la zona III, atrapada o libre, normalmente asciende a más del 95% del agua total de un producto alimenticio de alta humedad y su eliminación reduce la actividad de agua a 0.8 (Fennema, 1993 y Badui, 1993).

#### **c. Tipos**

Torres (1991), clasifica las isotermas de humedad en tres tipos, las cuales se aprecian en la Figura 4.



**Figura 4.** Tipos de Isotermas de Sorción de humedad de alimentos.

La isoterma tipo I, es común de los agentes antiaglomerantes. Estos ingredientes absorben agua en sitios específicos con una alta energía de ligazón y en una red de capilares no-hinchados, resultando en la retención de grandes cantidades de agua a baja  $A_w$ . Esto es mostrado en la subida vertical en la humedad a  $A_w$  bajas. Cuando todos los sitios de fijación, tanto como los capilares más estrechos están llenos, un incremento de humedad causa un gran incremento de la  $A_w$ . Este aumento, ocurre debido a que el material no se disuelve o hincha, así el agua adicionada interactúa solamente con el agua a través de puentes de hidrógeno débiles, formando una superficie de solución.

La isoterma tipo II, corresponde a la gran mayoría de alimentos, tales como los cereales. La curva sigmoideal resultante, es producido por la combinación de efectos coligativos, efectos capilares e interacciones superficie agua. Dos puntos de inflexión son evidenciados en la isoterma tipo II; el primero alrededor de 0,2 - 0,4 de  $A_w$  y el otro a 0,65 - 0,75 de  $A_w$ , el cual resulta de los cambios en la magnitud de los efectos físico-químicos separados.

La isoterma tipo III, representa la isoterma de adsorción para una sustancia cristalina pura (sacarosa) y muestra muy poca ganancia de humedad hasta la  $A_w$  por encima del punto donde el agua empieza a disolver la superficie de cristales ( $A_w$  0,7 - 0,8 para la sacarosa). La forma de esta curva, es producto de la interacción del agua, vía puentes de hidrógeno, con grupos hidroxilos en la superficie de cristal. Dado que es un efecto de superficie, la molienda del azúcar en partículas más pequeñas incrementa el contenido de humedad a bajas  $A_w$ , debido al aumento del área superficial por gramo. Así para cristales puros, la especificación del tamaño de tamiz y el tamaño de distribución son importantes para el contenido de agua como función de  $A_w$ .

#### **d. Métodos de determinación**

Para obtener la isoterma de sorción de humedad de un material o producto, el contenido de humedad de equilibrio debe ser determinado a varias actividades de agua. En general, una

simple aproximación para crear una isoterma de sorción de humedad de un alimento es colocar la muestra seca en cámaras con humedad controlada a temperatura constante y medir la ganancia de peso (es decir ganancia de humedad) con el tiempo hasta que ocurra el equilibrio en cada cámara (Bell y Labuza, 2000).

## 1) Método de Desecadores

### a) Control de la actividad de agua

**Desecador seco.** Para un material que tiene una isoterma de sorción de humedad tipo I es necesario una cámara con  $A_w$  cero. Sulfato de calcio (Drierite™) es comúnmente usado para producir una  $A_w$  alrededor de 0,0001. El pentóxido de fósforo puede también generar un ambiente seco, pero se torna explosivo si absorbe mucha agua o volátiles orgánicos, de modo que su uso es descartado (Bell y Labuza, 2000).

**Soluciones de sales.** Soluciones saturadas de varios ácidos orgánicos, bases, y alcoholes; así como de sales inorgánicas, producen una presión de vapor constante y son empleadas para controlar la  $A_w$  (Bell y Labuza, 2000).

**Soluciones de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.** Son empleadas para generar Aw constante. Dado que pueden ser preparadas a diferentes concentraciones, infinitos puntos de la isoterma pueden ser obtenidos. Sin embargo, la naturaleza corrosiva del ácido a Aw bajas, está ligada con accidentes. Asimismo, como están sujetas a la ganancia o pérdida de humedad durante el proceso de equilibrio higroscópico, deben ser tituladas para conocer la concentración final y por lo tanto la Aw (Bell y Labuza, 2000).

**Soluciones de glicerol.** Pueden ser empleadas para el control de la Aw. La naturaleza no corrosiva del glicerol evita el problema asociado con el empleo de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Permanece la situación generada por la ganancia o pérdida de humedad, debiendo analizarse la concentración de glicerol por cromatografía de gases. Adicionalmente, el glicerol puede volatilizarse y ser absorbido por el alimento, ocasionando errores si la ganancia de peso es usado para determinar el contenido de humedad de equilibrio (Bell y Labuza, 2000).

**Humificadores mecánicos.** La humedad relativa puede ser controlada usando humidificadores mecánicos, generalmente son adecuados para  $\pm 5\%$  de HR; pero son muy caras (Bell y Labuza, 2000).

**b) Contenedores de soluciones de sales**

Dependiendo de la extensión de la prueba y la cantidad de producto, varios tipos de contenedores (deseCADadores y jarras) pueden ser usados para mantener las muestras a  $A_w$  constante. Para una isoterma de sorción completa, generalmente ocho contenedores son requeridos. Sin embargo, cuando sea posible, más  $A_w$  deben ser usados.

**Tamaño de muestra.** Para la mayoría de ingredientes secos, homogéneos, 1-3 g es adecuado. Las muestras, por triplicado, son colocadas en placas de aluminio o vidrio (secadas en Drierite), si el espacio en el desecador lo permite. Las pesadas deben realizarse con una precisión de 0,0001 g (Bell y Labuza, 2000).

**Isoterma de adsorción verdadera.** Para una isoterma de adsorción verdadera, la muestra debe ser secada bajo condiciones que no induzcan reacciones adversas que puedan modificarla. Un sistema recomendado es una estufa a vacío, en el cual la bomba es conectada a través de una trampa de hielo seco-alcohol o nitrógeno líquido para alcanzar un vacío de alrededor de 25 mm Hg. El tiempo y temperatura depende del producto. Un liofilizador operando a 100  $\mu$ m Hg y 30°C es

probablemente el mejor método, pero se requiere de 2 a 3 días. El producto puede también ser secado empleando un desecante durante 4 a 8 semanas; sin embargo, esto prolonga el tiempo del experimento (Bell y Labuza, 2000).

**Isoterma de desorción.** Para una isoterma de desorción de humedad de tejidos alimenticios, la muestra es usada como tal. La humedad inicial es determinada empleando una técnica de secado de laboratorio (Bell y Labuza, 2000).

#### **Rango de $A_w$**

**Alimentos secos.** Para alimentos secos, 0,001-0,92 de  $A_w$ , son útiles para obtener una isoterma aplicable en un rango práctico de estabilidad del alimento. Sin embargo, si el ingrediente es un humectante, altas  $A_w$  serán necesarias. A  $A_w$  mayores de 0,84, puede ocurrir un rápido crecimiento microbiano en la muestra. Para prevenir esto, se puede aplicar vacío al desecador para crear un ambiente anaeróbico. Agentes antimicrobianos pueden ser incorporados al alimento, pero estos puede modificar la  $A_w$  y el perfil de la isoterma de sorción (Bell y Labuza, 2000).

**Alimentos semihúmedos.** Un rango más estrecho de la isoterma puede ser usado para alimentos semihúmedos. Generalmente un mínimo de 0,4 – 0,5 de  $A_w$ , si el producto tiene una  $A_w$  crítica en este rango debido a la dureza, y un máximo de 0,9 – 0,92 de  $A_w$ , para evitar la proliferación microbiana (Bell y Labuza, 2000).

**Tiempo de equilibrio.** Si la concentración de vapor de agua en el espacio de cabeza es adecuada, la ganancia o pérdida de humedad de la muestra dependerá básicamente de la resistencia interna al cambio de humedad y de la transferencia de calor de la muestra. Si la cantidad de muestra inicial se aproxima al volumen total de aire, la presión de vapor de agua en el espacio de cabeza no puede ser mantenida adecuadamente por evaporación de la superficie de la solución. Una razón del volumen de aire/volumen de muestra de 20:1 previene este evento.

El aire retiene poca agua, de modo que el incremento del volumen de la muestra, sin una adecuada superficie de la solución, retrasará el tiempo de equilibrio. Por ejemplo a 80% HR, 25°C y 760 mm Hg de presión total, 1 litro de aire retiene 18,4 mg de agua. Una rápida adsorción de 20 mg de agua por 5 g de muestra seca (es decir 0,4/100 g

sólidos) reducirá completamente la humedad del espacio de cabeza. Dispositivos tales como agitadores magnéticos en la solución o ventiladores, ayudarán a mantener una adecuada proporción humedad en el espacio de cabeza, pero reducirán la velocidad de equilibrio (Bell y Labuza, 2000).

Una aproximación para el tiempo de equilibrio, es asumir que más del 99% del equilibrio higroscópico es alcanzado en 21 días - excepto para muestras azucaradas-, de modo que sólo es necesario registrar el peso inicial y final (a las tres semanas). El conocimiento de la naturaleza del sistema, es importante en la determinación del tiempo de equilibrio (Bell y Labuza, 2000).

## **2) Microbalanza de atmósfera controlada (CAM)**

Permite determinar rápidamente la isoterma de sorción de humedad, usando miligramos de muestra de humedad inicial conocida. El sistema consta de una microbalanza aislada a través del cual pasa aire humidificado. La humedad relativa y el cambio de masa de la muestra son registrados mediante una microcomputadora. El criterio de equilibrio es predefinido (menos de 0,001 mg de cambio en masa de 5 mg de muestra por 30 minutos) a una humedad relativa dada. El sistema automáticamente procede a la siguiente humedad relativa

hasta completar la isoterma de sorción (Bell y Labuza, 2000). La isoterma generada guarda correlación con la generada usando desecadores.

Tiene la ventaja de completar la isoterma entera con pocos miligramos de muestra, lo cual es importante en el desarrollo de productos farmacéuticos, donde no se disponen de grandes tamaños de muestra. Como desventajas podemos citar que requiere de muestras homogénea y es 24 veces más costoso que el método de desecadores. Sistemas comerciales son el MB300W (VTI Corporation, Ralea, FL) y el Autosorb ®-1-C Chemisorption Physisorption Analyzer (Bell y Labuza, 2000).

### **3) Midiendo la $A_w$ en lugar de crear una isoterma**

Se preparan soluciones acuosas de composición variable, muestras humedecidas y muestras secas, y se permite que alcancen el equilibrio higroscópico. La  $A_w$  y el contenido de humedad son medidos por algún método apropiado. Instrumentos, calibrados y sensibles, como Aqualab, Hygroskop DT, y Novasina han sido satisfactoriamente empleados en alimentos (Bell y Labuza, 2000).

### e. Importancia

Las isotermas de sorción de humedad de alimentos son importantes por los siguientes aspectos:

- 1) Permiten determinar el calor de sorción o desorción; de utilidad en el diseño de sistemas de almacenamiento, secado y extrusión de cereales (Simoes y Pitombo, 1998).
- 2) Determinan la interacción del agua y sus componentes; información necesaria en el diseño de operaciones para el procesamiento de alimentos, tales como: secado, mezclado, empacado y almacenamiento (Diosady *et al.*, 1996).
- 3) Permiten investigar propiedades estructurales de los alimentos, tales como el área superficial específica, volumen de poros, distribución del tamaño de poros y cristalinidad; útil en la selección de las condiciones apropiadas de almacenamiento y sistemas de empacado, que maximicen la retención de aroma, color, textura, nutrientes y la estabilidad microbiológica (Diosady *et al.*, 1996).
- 4) Permiten establecer las condiciones críticas de humedad de un alimento, y consecuentemente el nivel de protección al vapor de agua requerido para preservar sus características originales (Simoes y Pitombo, 1998).
- 5) Definen a través del conocimiento de las propiedades de sorción de vapor de agua de biopolímeros, su posibilidad de uso en la elaboración de empaques comestibles (Monterrey y Sobral, 1998).

### **3. Modelos matemáticos de ajuste**

En el Cuadro 2, se presentan los principales modelos matemáticos de fijación de datos de isothermas de sorción de humedad.

## **C. MODELAMIENTO DE LA CINÉTICA DE GANANCIA DE HUMEDAD EN ALIMENTOS DESHIDRATADOS.**

### **1. Aspectos generales**

En la Figura 5, se muestra el sistema de un producto deshidratado empacado, almacenado en un ambiente de humedad relativa a temperatura constante (Jiménez, 1995).

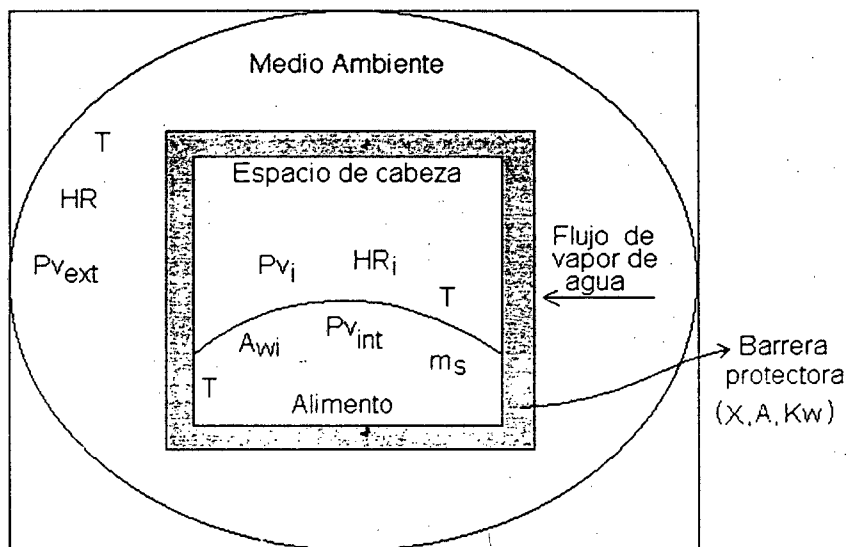
El objetivo inicial de un estudio experimental de cinética, es desarrollar un modelo matemático que describa la velocidad de reacciones en función a variables experimentales (Gill y Grieger-Block, 1980).

El establecimiento de modelos de cinética es necesario para: (1) mejorar un producto alimenticio, minimizando la pérdida del factor de calidad en un proceso existente, (2) desarrollar un nuevo producto y (3) predecir la vida útil (Lenz y Lund, 1980 y Saguy y Karel, 1980).

**Cuadro 2.** Modelos matemáticos de sorción de humedad.

Modelos	Expresión matemática	Aplicación
Smith	$M = A - B \ln (1-Aw)$	Describe adecuadamente las características de adsorción y desorción de las pecanas; aplicado en HR sobre 30% para maní y sobre 50% para trigo; presenta buen ajuste entre 0,5 a 0,9 de Aw.
Oswin	$M = t . ( Aw / (1 - Aw)) ^ S$	En alimentos con alto contenido de almidón y frutas con buen ajuste en 0,00 y 1,0 de Aw.
Kuhn	$M = (A / (\ln (Aw)) + B$	Buen ajuste en papas fritas hasta una Aw de 0,4.
Guggenheim, Anderson y de Boer: G.A.B	$M/Mo = (C K Aw) / [(1 - K Aw) (1 - K Aw + C K Aw)]$	Amplio rango de ajuste en Aw de 0,00 a 0,9 y utilizado para el cálculo de la capa monomolecular.
Lineal	$M = b . Aw + l$	Se adapta bien en isotermas de trigo a 25°C, ajusta en rango de Aw de 0,32 a 0,75.

**Fuente:** Smith (1995), Matos (1992), Jiménez (1995), Simoes y Pitombo (1998) y Cardoso y Labuza (1983).



**Figura 5.** Esquema de un producto contenido en un envase flexible.

Donde:

T : Temperatura

HR : Humedad relativa

$Pv_{int}$  : Presión de vapor en el interior del alimento

ms : Materia seca

$Aw$  : Actividad de agua

X, A, Kw : Espesor, área y permeabilidad del empaque

## 2. Cinética de ganancia de humedad

Labuza (1982), presenta un modelo para estudiar la cinética de absorción de humedad de un alimento empaquetado a temperatura constante, la misma que constituye una ecuación diferencial, basada en la Ley de Fick y de Henry:

$$\frac{dw}{d\theta} = \frac{k}{x} \cdot A (PV_{ext.} - PV_{int.})$$

Donde:

$dw/d\theta$  : Velocidad de transporte de agua, expresada en gramos de agua ganada o perdida por día.

$k/x$  : Permeabilidad del empaque al vapor de agua, en g de agua/día.m<sup>2</sup>.mmHg

A : Area de exposición del empaque expuesto al medio, en m<sup>2</sup>.

$PV_{ext}$  : Presión de vapor de agua del medio ambiente, en mmHg.

$PV_{int}$  : Presión de vapor de agua del alimento, dependiente de la actividad de agua, en mmHg.

Pfeiffer *et al.* (1999), mencionan que es razonable la aproximación de que toda el agua transferida a través del empaque es absorbida por el alimento. Esto puede ser explicado, considerando que el aire saturado a temperatura ambiente contiene 0,0002 gramos de agua / cm<sup>3</sup>; en tanto, que 1 gramo de producto seco puede retener 0,1 gramos de agua.

La humedad relativa afecta directamente el contenido de humedad y la actividad de agua de un alimento, y es considerado el segundo factor más importante que regula la velocidad de las reacciones de deterioro. Niveles críticos de actividad de agua pueden regular el deterioro del alimento, mediante el crecimiento microbiano o los cambios en la textura. El contenido de humedad y la actividad de agua influye en los parámetros de cinética (constante de velocidad,

energía de activación), concentración de reactantes y en algunos casos en el orden aparente de la reacción (Labuza, 1999).

### **3. Modelamiento de la cinética de ganancia de humedad**

Tomando como base el modelo de ganancia de humedad, es posible determinar la vida útil de un producto empacado, en función a su ganancia de humedad; para lo cual se debe realizar las siguientes asunciones:

- a. La presión interna y la permeabilidad al vapor de agua son constantes.
- b. La isoterma de adsorción es lineal y no depende de la temperatura.
- c. Se alcanza rápidamente el equilibrio de la presión de vapor de agua entre el producto y la atmósfera que lo rodea, delimitada por el material de empaque (Labuza, 1982; Bureau y Multon, 1995).

Las dos primeras asunciones no son completamente verificables. Así, la presión interna aumenta conforme el alimento absorbe humedad, y la permeabilidad al vapor de agua depende de la temperatura y la humedad relativa (Labuza, 1982).

Es posible determinar la vida útil de un alimento empacado en términos de la ganancia o pérdida de humedad, sin considerar reacciones secundarias bioquímicas. Para ello, se resuelve la

ecuación diferencial de la forma  $dt = Kf(Aw) dAw$ , mediante métodos numéricos (Bureau y Multon, 1995).

Mizrahi (1977) citado por Saguy y Karel (1980), desarrollaron un modelo para predecir la estabilidad en almacenamiento isotérmico de alimentos empacados en envases permeables al vapor de agua. El método, no requiere el conocimiento de modelos de cinética dependientes del contenido de humedad y puede ser aplicado en alimentos deshidratados, cuando el índice de deterioro es dependiente solamente del contenido de humedad.

La pérdida o ganancia de humedad a través de un empaque depende de la isoterma de sorción del material alimenticio, las condiciones de temperatura y humedad relativa a la que es almacenada, y la permeabilidad al vapor de agua del material de empaque (Cardoso y Labuza, 1983).

Modelos de transporte de humedad permiten la computación de la actividad de agua del alimento, en función a la humedad relativa del ambiente, la temperatura, las propiedades de barrera del empaque seleccionado y la isoterma de adsorción del alimento. El conocimiento de la temperatura y la actividad de agua, puede ser usado en un modelo computarizado para estimar la pérdida de calidad y la vida útil de un sistema alimento-empaque, bajo diversas condiciones de distribución y almacenamiento (Labuza, 1999).

Jiménez (1995), empleando el modelo de transferencia de humedad en alimentos empacados y mediante transformaciones matemáticas; obtuvo un modelo matemático diferencial de predicción de vida útil de papas fritas, en función a la ganancia de humedad:

$$\frac{dY_3}{d\theta} = \frac{K_w A P_s}{x m_s - P_5} \left[ \frac{HRE}{HRI_{\max}} - Y_3 \right] Y_3 HRI_{\max} \left[ \ln \left( \frac{Y_3 HRI_{\max}}{100} \right) \right]^2$$

Donde:

- $P_5$  : Parámetro del modelo de Isoterma de Kuhn.
- $K_w$  : Permeabilidad al vapor de agua del empaque.
- $x$  : Espesor del empaque.
- $A$  : Area del empaque.
- $m_s$  : Materia seca del producto empacado.
- $P_s$  : Presión de vapor de agua pura a la temperatura de almacenamiento.
- $HRE$  : Humedad relativa del ambiente.
- $HRI_{\max}$  : Humedad relativa máxima del producto empacado.  
Determina su vida útil.
- $Y_3$  : Parámetro adimensional, que cuando tiende a 1, indica la vida útil del producto.

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **A. LUGAR Y FECHA DE EJECUCION**

El presente trabajo de investigación, se desarrolló en el laboratorio de Análisis de Alimentos de la Facultad de Industrias Alimentarias en la Universidad Nacional Agraria de la Selva; ubicada en la Provincia de Leoncio Prado, Departamento de Huánuco, desde Octubre del 2000 a Mayo del 2001.

#### **B. MATERIALES Y EQUIPOS**

##### **1. Materia Prima**

Se utilizó harina de plátano de la Planta Agroindustrial San Miguel, proveniente de un mismo lote.

##### **2. Materiales, reactivos y equipos**

###### **a. Para la caracterización granulométrica y el análisis químico proximal**

- Juego de tamices con abertura de: 1,00 ; 0,710 ; 0,425 ; 0,250 ; 0,106 ; 0,053 mm y plato de acero inoxidable, marca Sandberg y Schneidewind - Alemania.
- Vibrador eléctrico marca Retsch, Type 3D, Alemana.
- Balanza analítica, marca Ohaus con sensibilidad 0,001 mg.
- Equipo Soxhlet, Precision Scientific Group CGA. Chicago - USA.

- Equipo de digestión y destilación para la cuantificación de proteína, LABCONCO.
- Mufia modelo MLW, de fabricación Húngara.
- Estufa LAB-LINE Instrument, Inc. Melrose
- Materiales de vidrio de diferentes capacidades
- Papel filtro Watman N° 40.
- Eter de petróleo, solución de ácido clorhídrico 0,019 N y al 1,5%, ácido sulfúrico Conc. 25 ml, solución de ácido bórico al 2%, solución de hidróxido de sodio al 1,25%.

**b. Para la determinación de isoterma de adsorción**

- Campanas de vidrio
- Termómetro digital de  $-50$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , marca Multi-Termometer
- Placas petri de vidrio.
- Soluciones acuosas saturadas de: Carbonato de potasio, Bromuro de sodio, Nitrito de sodio, Cloruro de sodio, Cloruro de potasio.
- Estufa bacteriológica con temperatura regulable.
- Recipientes de plástico, que actuaron como contenedores de las soluciones de sales saturadas.

**c. Para la determinación de la permeabilidad al vapor de agua del empaque**

- Recipientes de plástico, que actuaron como contenedores de las soluciones de sales saturadas y para colocar el empaque con la sal desecante.
- Soluciones acuosas saturadas de: Nitrato de potasio, Sulfato de amonio, Cloruro de calcio (como desecante).

**d. Para la predicción y validación**

- Soluciones acuosas saturadas de: Sulfato de amonio, Nitrato de potasio.
- Microcomputadora PC AT Pentium-233 MHz, con software Visual Basic, Estadística, SPSS e Instat.

**C. METODOS DE ANALISIS**

**1. Análisis químico proximal**

Se realizó de acuerdo a los métodos recomendados por la A.O.A.C.

(1997):

<u>Análisis</u>	<u>Códigos</u>
- Sólidos totales (humedad)	925.10
- Hidrólisis ácida (grasa)	922.06
- Proteína (total)	920.87
- Ceniza	923.03
- Fibra cruda	962.09E

## **2. Análisis granulométrico**

Se realizó de acuerdo al método de Correlación de Rosim, Rammler y Sperling, propuesto por Ibarz *et al* (2000), (Anexo 1).

## **3. Determinación de la isoterma de adsorción**

Se determinó mediante el método recomendado por Labuza (1999), que se detalla en el Anexo 2.

## **4. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua del empaque.**

Se determinó mediante un procedimiento adaptado del método estándar D 895 - 79 de la ASTM (1984), detallado en el Anexo 3.

## **D. METODOLOGIA**

La metodología empleada en el desarrollo del presente trabajo de investigación se muestra en la Figura 6.

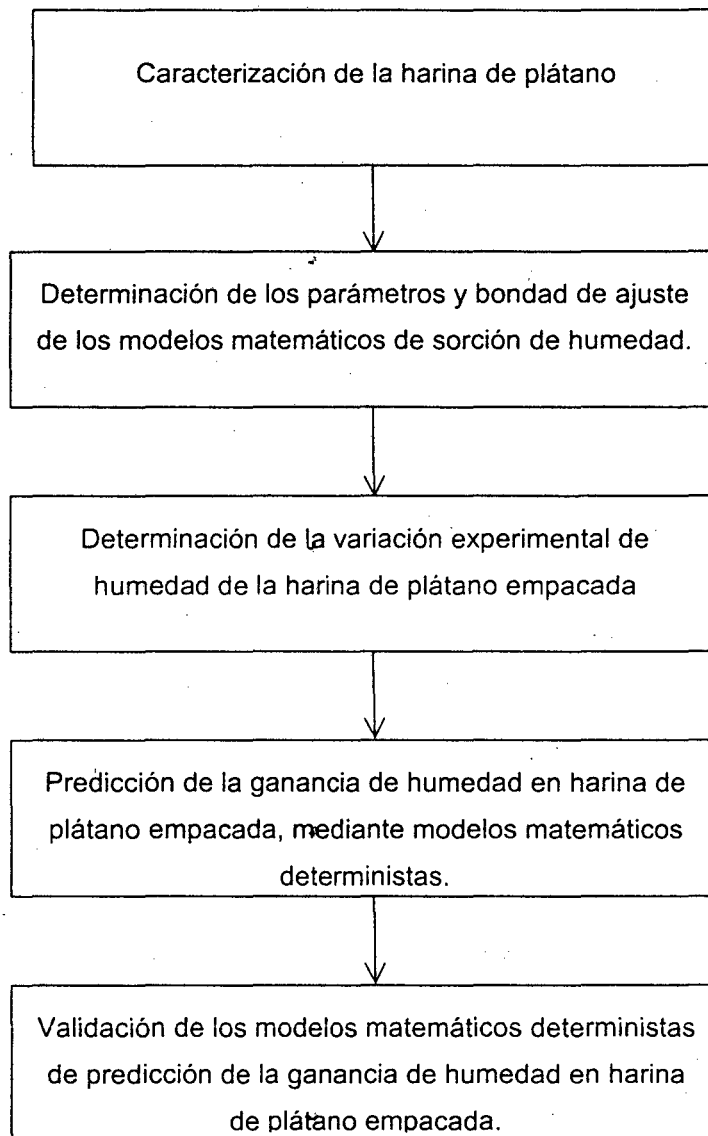
### **1. Caracterización de la harina de plátano**

#### **a. Química proximal**

Se determinó la composición química proximal, por triplicado.

#### **b. Granulométrica**

El análisis granulométrico se determinó por triplicado tomando 100 g de muestra que se colocan en un juego de tamices y este a un vibrador eléctrico a 90 rpm/10 minutos, para establecer el índice de uniformidad del tamaño de partículas de la harina de plátano.



**Figura 6.** Etapas para la predicción de ganancia de humedad en harina de plátano empacada, mediante modelos matemáticos deterministas.

### **c. De la isoterma de adsorción de humedad**

La isoterma de adsorción de la harina de plátano se determinó a 29,2 °C, con la finalidad de obtener datos de humedad de equilibrio para posteriormente establecer los modelos matemáticos de sorción de humedad.

## **2. Determinación de los parámetros y bondad de ajuste de los modelos matemáticos de sorción de humedad**

Los valores experimentales de humedad de equilibrio en función de la actividad de agua fueron ajustados a los siguientes modelos de sorción: G.A.B, Smith, Oswin, Kuhn y Lineal.

La bondad de ajuste de los modelos de sorción fue establecido en base al coeficiente de determinación ( $R^2$ ) determinado mediante análisis de regresión no lineal y al porcentaje de la raíz cuadrada media del error relativo (% RSM).

## **3. Variación experimental de humedad de la harina de plátano empacada**

En el Cuadro 3, se muestra las condiciones experimentales a las que fue sometida la harina de plátano empacada.

**Cuadro 3.** Condiciones experimentales sometida a la harina de plátano empacada a 29,2 °C.

Condiciones experimentales	Humedad relativa*
A	92,4187 %
B	80,6888 %

(\*) Estimados de acuerdo a la ecuación  $\ln A_w = a (1/T) + b$ , reportado por Labuza (1996), ver Anexo 7.

Se determinó la humedad inicial de la harina de plátano, fueron colocados en recipientes que presentaban como tapa un empaque de polietileno de baja densidad de permeabilidad conocida y se monitoreó el peso de la misma durante 30 días a intervalos de 3 días, por triplicado. Estos y la humedad inicial fueron empleados para calcular la humedad en base seca de la harina al finalizar la evaluación.

#### **4. Predicción de la ganancia de humedad en harina de plátano empacada, mediante modelos matemáticos deterministas**

##### **a. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua del empaque**

Se determinó a 29,2°C y a humedades relativas de 80,6888% y 92,4187%, con la finalidad de obtener datos que permitirán establecer la predicción de ganancia de humedad de la harina de plátano empacada.

**b. Implementación de los modelos matemáticos deterministas de predicción de ganancia de humedad en harina de plátano**

Los modelos matemáticos deterministas de predicción de ganancia de humedad fueron establecidos empleando la ecuación de transferencia de agua en alimentos empacados. Para ello, se transformó la ganancia de agua  $dW/d\theta$ , en velocidad de cambio del porcentaje de humedad en base seca. El valor de actividad de agua del producto y del medio exterior, fue estimado a partir de los diferentes modelos de sorción de humedad.

**c. Simulación de la ganancia de humedad en harina de plátano empacada**

En la Figura 7, se muestra el algoritmo del programa de predicción de ganancia de humedad. La resolución de los modelos matemáticos deterministas se efectuó mediante el método de integración numérica de Simpson, reportado por Nieves y Domínguez (1996); cuya expresión básica es:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{3} \left[ f(a) + 4f(a+h) + 2f(a+2h) + 4f(a+3h) + \dots + f(b) \right]$$

Donde:

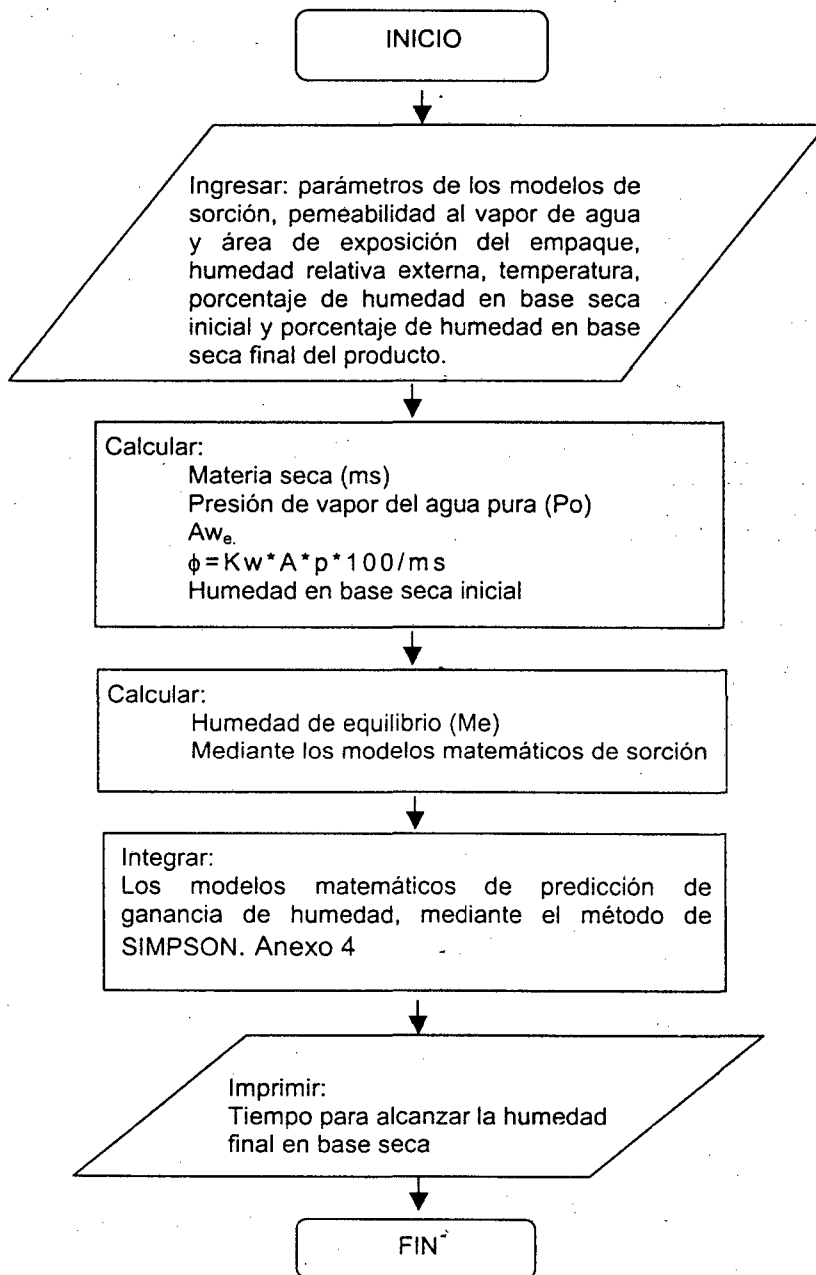
$f(x)$  : Función a integrar

$a, b$  : Límite inferior y superior de integración, respectivamente.

h : Incremento de la variable usada en la evaluación de la función humedad. Determina la precisión de la integración numérica.

**5. Validación de los modelos matemáticos de predicción de ganancia de humedad en harina de plátano empacada**

Los valores de humedad experimental y los estimados por los modelos matemáticos fueron sometidos al estadístico t-student, para determinar la bondad de las predicciones de ganancia de humedad.



**Figura 7.** Diagrama de flujo del algoritmo del programa para predicción de ganancia de humedad de harina de plátano.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### A. CARACTERIZACIÓN DE LA HARINA DE PLÁTANO

#### 1. Química proximal

En el Cuadro 4, se observa el análisis químico proximal de la harina de plátano.

**Cuadro 4.** Composición química proximal de la harina de plátano, g /100 g materia húmeda (media  $\pm$  SEM, n=3).

Componentes	%
Humedad	7,01 $\pm$ 0,66
Grasa	0,57 $\pm$ 0,035
Proteína (Nx6,25)	3,53 $\pm$ 0,31
Fibra	1,17 $\pm$ 0,22
Ceniza	2,08 $\pm$ 0,057
Carbohidratos (por diferencia)	85,54

Los valores de ceniza, fibra, proteína y grasa son muy cercanos a los reportados por Collazos (1993), de 2,00 , 1,10 , 3,10 y 0,40%, respectivamente; Asimismo, en carbohidratos reporta 78,50%, notándose una diferencia significativa debido al bajo contenido de humedad de la harina (14,90%).

## 2. Granulométrica

En el Cuadro 5, se muestran los parámetros del modelo matemático para determinar la uniformidad del tamaño de partículas de la harina de plátano, obtenido mediante regresión no lineal de los valores experimentales del tamizado de la harina de plátano, el mismo que se observa en el Anexo 5.

**Cuadro 5.** Parámetros del modelo matemático para el análisis granulométrico de la harina de plátano (media  $\pm$  SEM, n=3).

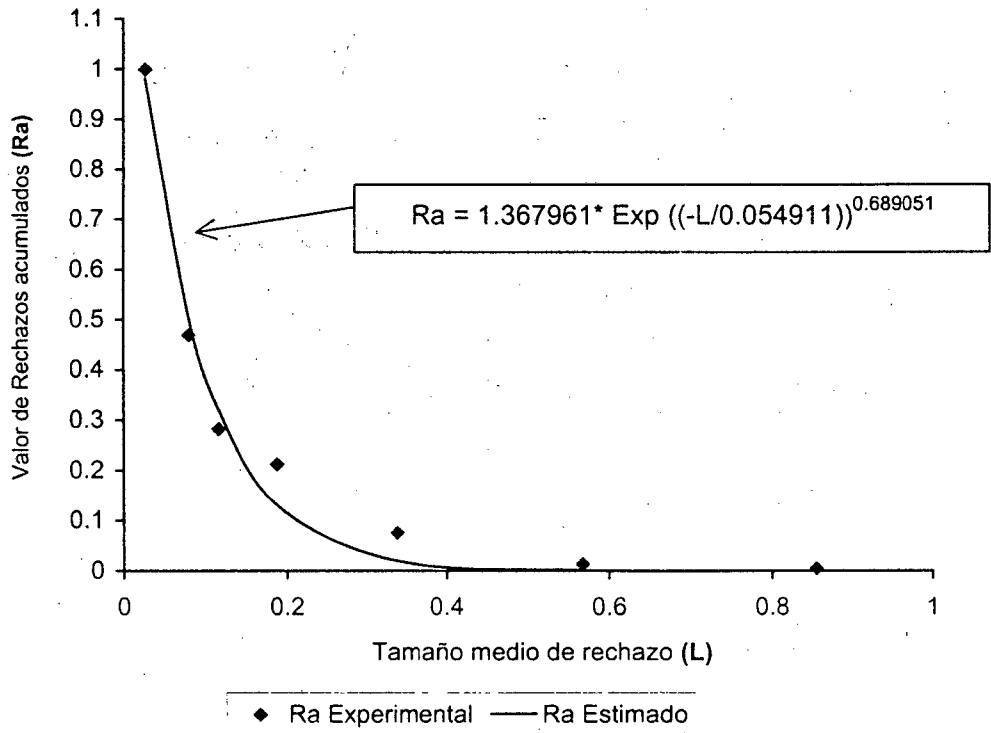
<b>MODELO : <math>R_a = M \cdot \text{Exp} (-L / L')^n</math></b>				
	Parámetros del modelo			
	M	L'	n	R <sup>2</sup>
Promedio	1,367961	0,054911	0,689051	98,242
SEM	0,007005	0,007984	0,114822	

M : Parámetro del modelo ; L' : Tamaño medio estadístico.

n : Índice de uniformidad de tamaños.

En el Cuadro 5, observamos que el valor del índice de uniformidad de tamaños (n) en promedio es 0,689, y de acuerdo a lo reportado por Ibarz *et al* (2000), menciona que a valores de  $n < 1$  no hay máximo en la curva, lo que nos indica que no hay uniformidad en el tamaño de

las partículas de la harina de plátano, como se observa en la tendencia de la curva de la Figura 8.



**Figura 8.** Curva de frecuencia de tamaños de la harina de plátano.

### 3. De la isoterma de adsorción de humedad

En el Cuadro 6, se muestran los valores de humedad de equilibrio de la harina de plátano a 29,2 °C. El equilibrio higroscópico fue alcanzado a los 11 días (Anexo 6).

Los valores de actividad de agua, corresponden a la humedad relativa generada por las soluciones acuosas de sales saturadas las

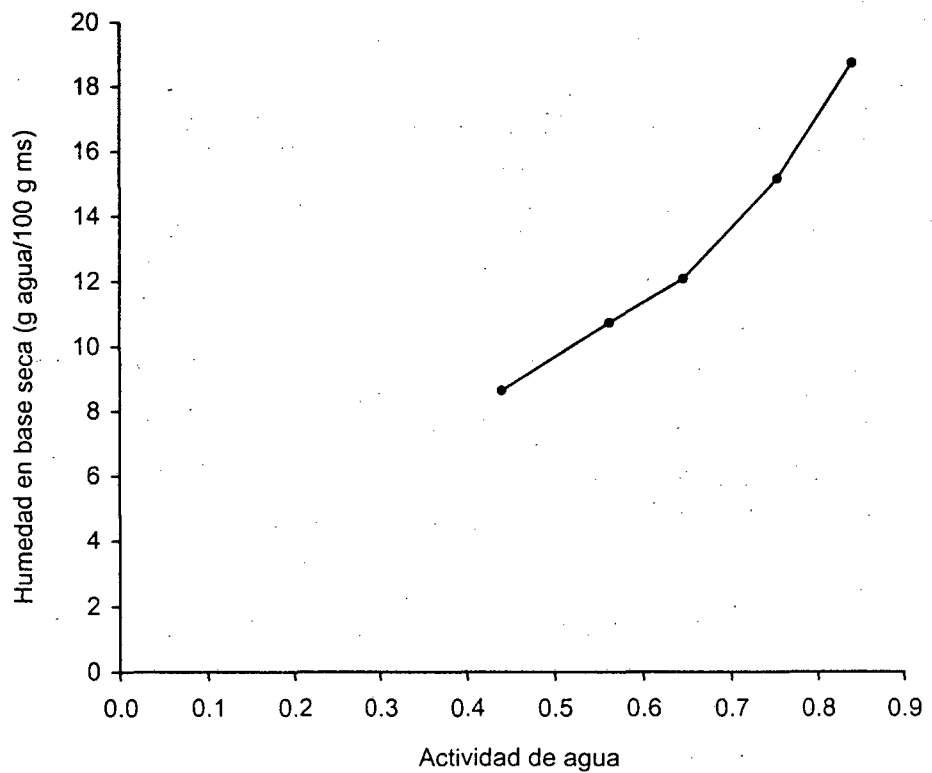
que fueron determinadas mediante ecuaciones y valores reportados por Labuza (1999), presentados en el Anexo 7.

**Cuadro 6.** Humedad de equilibrio de la harina de plátano a 29,2°C<sup>(α)</sup>  
(media ± SEM, n=3).

<b>Solución saturada</b>	<b>Actividad de agua</b>	<b>% Humedad de equilibrio en base seca</b>	<b>SEM</b>
Carbonato de potasio	0,4404	8,6167	0,0322
Bromuro de sodio	0,5627	10,7175	0,0616
Nitrito de sodio	0,6457	12,1361	0,0115
Cloruro de sodio	0,7539	15,1361	0,0257
Cloruro de potasio	0,8406	18,6826	0,0391

<sup>(α)</sup>: Temperatura en el interior de los desecadores.

La Figura 9, muestra que la isoterma de adsorción de humedad de la harina de plátano presenta forma sigmoïdal, tipo II, que corresponde a la gran mayoría de alimentos, como los cereales por su elevado contenido en biopolímeros (Torres, 1991).



**Figura 9.** Isoterma de adsorção de humidade da farinha de plátano a 29,2 °C.

## **B. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS Y BONDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE SORCIÓN DE HUMEDAD.**

### **1. Parámetros**

En el Cuadro 7, se muestra los parámetros de los modelos matemáticos de sorción de humedad obtenidos mediante análisis de regresión no lineal de los valores de humedad de equilibrio de la harina de plátano a 29,2 °C.

**Cuadro 7.** Parámetros de los modelos de sorción de humedad de harina de plátano.

Modelos de Sorción	Parámetros <sup>(*)</sup>	
Smith	A = 3,973419	B = 7,977711
Oswin	t = 9,564606	S = 0,403881
Kuhn	A = - 2,14709	B = 6,79662
Lineal	b = 24,58704	l = - 2,90673
G.A.B	C = 22,42846	K = 0,81434
	Mo = 6,0095	

(\*): Parámetros estimados mediante regresión no lineal del Statistica; procedimiento de optimización Quasi-Newton (Brumovsky y Brumovsky, 1996).

Los parámetros del modelo de Oswin son cercanos a lo reportado por Carvalho y Ribeiro (1996) en galletas de agua a partir de harina de yuca (t = 6,201 y S = 0,555).

En el modelo teórico de G.A.B, el valor de monocapa (Mo) depende de la temperatura y es inferior a 6 g agua/100 g materia seca, similar a lo reportado por Kim *et al.* (1999), quienes determinaron para crackers a 20°C, 5 g agua/100 g materia seca. El parámetro K es inferior a 1, correspondiendo a los aspectos teóricos del modelo

Diosady *et al.* (1996). El parámetro C es el más afectado con la temperatura, por lo que las magnitudes difieren significativamente con lo obtenido para crackers por Kim *et al.* (1999), lo cual guarda relación con la diferencia en la naturaleza de las muestras.

## 2. Bondad de ajuste

En el Cuadro 8, se muestra los parámetros de bondad de ajuste ( $R^2$  y % RSM) respectivamente. El ANVA de la regresión no lineal para cada modelo matemático se presenta en el Anexo 8.

**Cuadro 8.** Parámetros de bondad de ajuste de los modelos de sorción humedad de la harina de plátano.

Modelos de Sorción	$R^2$	% RSM <sup>(*)</sup>
Oswin	99,926 %	0,734304
Smith	99,903 %	0,759259
G.A.B	99,918 %	0,837140
Kuhn	97,481 %	5,135322
Lineal	96,062 %	5,496335

$$(*) : \%RSM = 100 \cdot \frac{\sum ((M_{\text{experimental}} - M_{\text{estimada}}) / M_{\text{experimental}})^2}{\text{Número de datos experimentales}}$$

Los cálculos de % RSM se observan en el Anexo 9.

Los modelos de sorción de humedad que mejor describen los datos de humedad de equilibrio de la harina de plátano, en orden decreciente de su bondad de ajuste son: a) Oswin, b) Smith, c) G.A.B y d) Kuhn; por lo que conjuntamente fueron usados en el desarrollo de los modelos matemáticos deterministas.

El %RSM fue inferior al 5% para la temperatura estudiada, lo cual es reportado como satisfactorio por Saravacos *et al.* (1986). Diosady *et al.*, (1996) mencionan que valores de %RSM entre 2 y 3% son indicadores de buen ajuste.

El modelo de Oswin es recomendada para productos alimenticios con alto contenido de almidón, componente principal de la harina de plátano, en el rango de 0,00 a 1,00  $A_w$  (Matos, 1992).

El modelo de Smith fue desarrollado en base a las características de sorción de grandes polímeros (carbohidratos y proteínas), adecuándose para humedades relativas sobre 50% para trigo (Smith, 1995).

El modelo de G.A.B, es recomendada por el Grupo Europeo COST 90 para productos alimenticios en el rango de 0,00 a 0,90 de actividad de agua (Matos, 1992).

Jiménez (1995), aplicó con buen ajuste el modelo de Kuhn a datos de isoterma de adsorción de papas fritas.

### C. VARIACIÓN EXPERIMENTAL DE HUMEDAD DE LA HARINA DE PLÁTANO EMPACADA

Las muestras de harina de plátano fueron expuestas a las condiciones A y B que se muestran en el Cuadro 9.

Las humedades relativas en el interior de los desecadores, para las condiciones A y B, fueron controladas empleando soluciones acuosas saturadas de sulfato de amonio y nitrato de potasio, respectivamente.

**Cuadro 9.** Condiciones experimentales para determinar la variación de ganancia de humedad en harina de plátano empacada.

Alimento – Empaque – Entorno	Condición A	Condición B
<b>Alimento:</b>		
- Peso (g)	4,0071	4,0128
- Humedad inicial (g agua/100 g)	7,01	7,01
<b>Empaque:</b>		
- Permeabilidad al vapor de agua (g agua/m <sup>2</sup> .día.mmHg) <sup>(+)</sup>	0,2521	0,1757
- Area (m <sup>2</sup> )	0,00717	0,00714
<b>Entorno:</b>		
- Humedad relativa (%)	92,4187	80,6888

<sup>(+)</sup> : Determinación ver Anexo 10.

En los Cuadros 10 y 11, se muestran la variación experimental de humedad en base seca de la harina de plátano expuestos a las condiciones A y B.

**Cuadro 10.** Variación de la humedad en base seca de la harina de plátano sometida a la condición A (media  $\pm$  SEM, n=3).

Tiempo (días)	Humedad en base seca (g agua/100 g materia seca)	SEM
3,0118	10,1226	0,1086
6,0069	11,6662	0,1405
9,0674	12,9534	0,1523
12,037	13,9341	0,1593
15,0479	14,8296	0,1708
18,0424	15,5494	0,1729
21,0646	16,1204	0,1813
24,0813	16,7112	0,1826
27,1181	17,2831	0,1812
30,1931	17,6076	0,1449

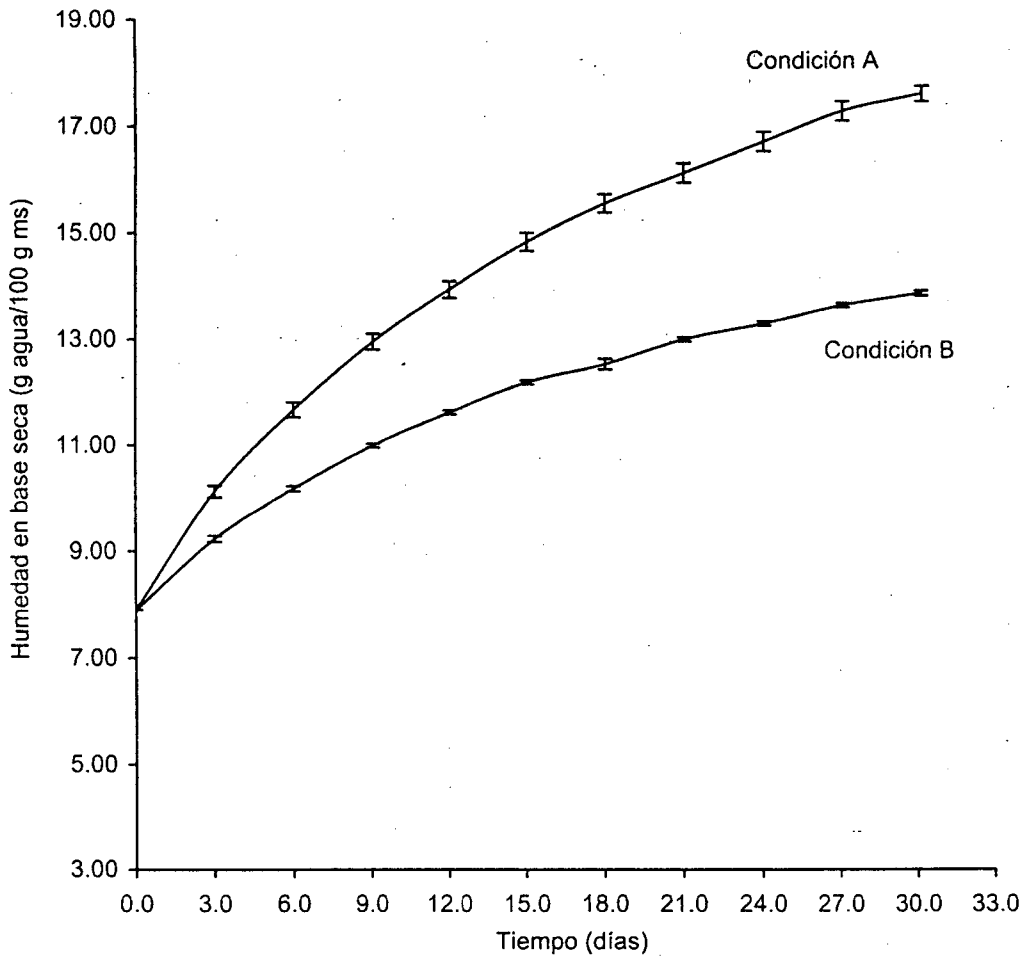
**Cuadro 11.** Variación de la humedad en base seca de la harina de plátano sometida a la condición B (media  $\pm$  SEM, n=3).

Tiempo (días)	Humedad en base seca (g agua/100 g materia seca)	SEM
3,0104	9,2297	0,0555
6,0069	10,1766	0,0487
9,0674	10,9888	0,0391
12,0375	11,6153	0,0375
15,0452	12,1834	0,0395
18,0424	12,5290	0,1007
21,0653	12,9984	0,0381
24,0819	13,2981	0,0405
27,1139	13,6392	0,0439
30,1424	13,8663	0,0499

En la Figura 10, se muestra la variación experimental de humedad en base seca de la harina de plátano sometida a las condiciones A y B, respectivamente.

El perfil de humedad en base seca de la harina de plátano empacada para ambas condiciones difiere ligeramente, esto puede explicarse porque el valor de permeabilidad al vapor de agua del empaque varía con las condiciones de humedad relativa y temperatura del entorno; similar a lo reportado por Diosady *et al.* (1996) quienes utilizando dos tipos de

empaques encontraron para Melinex 813 (0,88 g agua/día.m<sup>2</sup>.mmHg) y propafilm C (0,122 g agua/día.m<sup>2</sup>.mmHg).



**Figura 10.** Variación experimental de la humedad en base seca de la harina de plátano empacada, sometida a la condición A y B.

## D. PREDICCIÓN DE LA GANANCIA DE HUMEDAD DE HARINA DE PLÁTANO EMPACADA, MEDIANTE MODELOS MATEMÁTICOS.

### 1. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua del empaque.

En el cuadro 12, se observa los valores de permeabilidad al vapor de agua del empaque de la harina de plátano a dos humedades relativas, notándose que existe una diferencia en los valores, esto se debe a las condiciones de humedades relativas diferentes a las que fue sometido el empaque. La velocidad constante de ganancia de humedad se alcanzó en un día pesándose cada 4 horas aproximadamente.

**Cuadro 12.** Permeabilidad al vapor de agua del empaque en g. agua/día.m<sup>2</sup>.mmHg. (media ± SEM, n=3).

	Sales saturadas	
	KNO <sub>3</sub> HR: (92,4187 %)	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HR: (80,6888%)
Promedio	0,2521	0,1757
SEM	0,0127	0,0059

### 2. Implementación de los modelos matemáticos deterministas de predicción de ganancia de humedad en harina de plátano.

Los modelos matemáticos deterministas de predicción de ganancia de humedad fueron establecidos empleando la ecuación de transferencia de agua en alimentos empacados, como se muestra:

Ecuación básica: 
$$\frac{dw}{d\theta} = Kw A (Pv_{ext} - Pv_{int}) \dots\dots\dots (1)$$

Además: 
$$M = \frac{w}{ms} \times 100 \quad \dots\dots\dots > \quad w = \frac{ms}{100} \times M$$

M es el porcentaje de humedad en base seca

$$\frac{dw}{d\theta} = \frac{ms}{100} \frac{dM}{d\theta} \dots\dots\dots (2)$$

$$Pv_{ext} = Aw_e \cdot Po \quad , \quad Pv_{int} = Aw_i \cdot Po$$

Reemplazando ecuación (2),  $Pv_{ext}$  y  $Pv_{int}$  en ecuación (1) y factorizando  $Po$ , obtenemos:

$$\frac{dM}{d\theta} = Kw \cdot \frac{A}{ms} \cdot Po \cdot (Aw_e - Aw_i) \cdot 100 \dots\dots\dots (3)$$

Luego despejamos la actividad de agua de las ecuaciones de los modelos matemáticos de sorción de humedad con mejor bondad de ajuste. A continuación mostramos las expresiones matemáticas de estimación de la actividad de agua:

Modelo de Oswin: 
$$Aw = \frac{(M/t)^{1/S}}{1 + (M/t)^{1/S}}$$

Modelo de Smith : 
$$Aw = 1 - e^{-\frac{A-M}{B}}$$

Modelo de G.A.B: 
$$Aw = \frac{2 + \left(\frac{Mo}{M} - 1\right)C - \left[ \left(2 + \left(\frac{Mo}{M} - 1\right)C\right)^2 - 4 + 4C \right]^{0,5}}{2 \cdot K(1-C)}$$

**Modelo de Kuhn:**  $A_w = e^{\frac{A}{M-B}}$

Finalmente, las actividades de agua de los modelos matemáticos de sorción se reemplazaron en la ecuación (3), para establecer los modelos de predicción de ganancia de humedad (MPGH), considerando la humedad de equilibrio como la humedad relativa del medio ambiente (Me) y la humedad en base seca del producto como M, lo que mostramos a continuación:

**Modelo PGH de Oswin:**

$$\frac{dM}{d\theta} = K_w \cdot \frac{A}{ms} \cdot 100 \cdot P_o \left( \frac{\left(\frac{Me}{t}\right)^{1/s}}{1 + \left(\frac{Me}{t}\right)^{1/s}} - \frac{\left(\frac{M}{t}\right)^{1/s}}{1 + \left(\frac{M}{t}\right)^{1/s}} \right)$$

Integrando obtenemos:

$$\int_{M_i}^{M_f} \frac{dM}{\left[ \frac{\left(\frac{Me}{t}\right)^{1/s}}{1 + \left(\frac{Me}{t}\right)^{1/s}} - \frac{\left(\frac{M}{t}\right)^{1/s}}{1 + \left(\frac{M}{t}\right)^{1/s}} \right]} = \varphi \theta$$

**Modelo PGH de Smith:**

$$\frac{dM}{d\theta} = K_w \cdot \frac{A}{ms} \cdot 100 \cdot P_o \left( e^{\frac{A-M}{B}} - e^{\frac{A-Me}{B}} \right)$$

Integrando obtenemos:

$$\frac{M_f}{M_i} \frac{dM}{e^{\frac{A-M}{B}} - e^{\frac{A-M_e}{B}}} = \varphi \theta$$

Modelo PGH de G.A.B.

$$\frac{dM}{d\theta} = Kw \cdot \frac{A}{ms} \cdot \frac{Po}{2K(1-C)} \cdot 100 \left( \begin{array}{l} 2 + \left(\frac{Mo}{Me} - 1\right)C - \left\{ \left[ 2 + \left(\frac{Mo}{Me} - 1\right)C \right]^2 - 4 + 4C \right\}^{0,5} \\ - 2 + \left(\frac{Mo}{M} - 1\right)C - \left\{ \left[ 2 + \left(\frac{Mo}{M} - 1\right)C \right]^2 - 4 + 4C \right\}^{0,5} \end{array} \right)$$

Integrando obtenemos:

$$\frac{M_f}{M_i} \frac{dM}{\beta - \left( \left(\frac{Mo}{M} - 1\right)C + \left\{ \left[ 2 + \left(\frac{Mo}{M} - 1\right)C \right]^2 - 4 + 4C \right\}^{0,5} \right)} = \varphi \theta$$

Donde:

$$\beta = \left(\frac{Mo}{Me} - 1\right)C - \left\{ \left[ 2 + \left(\frac{Mo}{Me} - 1\right)C \right]^2 - 4 + 4C \right\}^{0,5}$$

$$\varphi = Kw \cdot \frac{A}{ms} \cdot \frac{Po}{2K(1-C)} \cdot 100$$

Modelo PGH de Kuhn:

$$\frac{dM}{d\theta} = Kw \cdot \frac{A}{ms} \cdot 100 \cdot Po \left( e^{\frac{A}{Me-B}} - e^{\frac{A}{M-B}} \right)$$

Integrando obtenemos:

$$\int_{M_i}^{M_f} \frac{dM}{e^{Me-B} - e^{M-B}} = \varphi \theta$$

### 3. Simulación de la ganancia de humedad en harina de plátano empacada

Teniendo en cuenta la bondad de ajuste, se consideraron los modelos matemáticos de sorción de Oswin, Smith, G.A.B y Kuhn, para lo cual se desarrolló un programa computarizado de simulación en entorno Visual Basic para Windows que predice la ganancia de humedad, mostrado en el Anexo 11.

Los modelos matemáticos de predicción de ganancia de humedad (MPGH) implementados, estiman el tiempo necesario para alcanzar un determinado nivel de humedad experimental (Cuadro 10 y 11) para condiciones establecidas.

En los Cuadros 13 y 14, se muestran los valores de tiempos estimados por los modelos matemáticos para las dos condiciones.

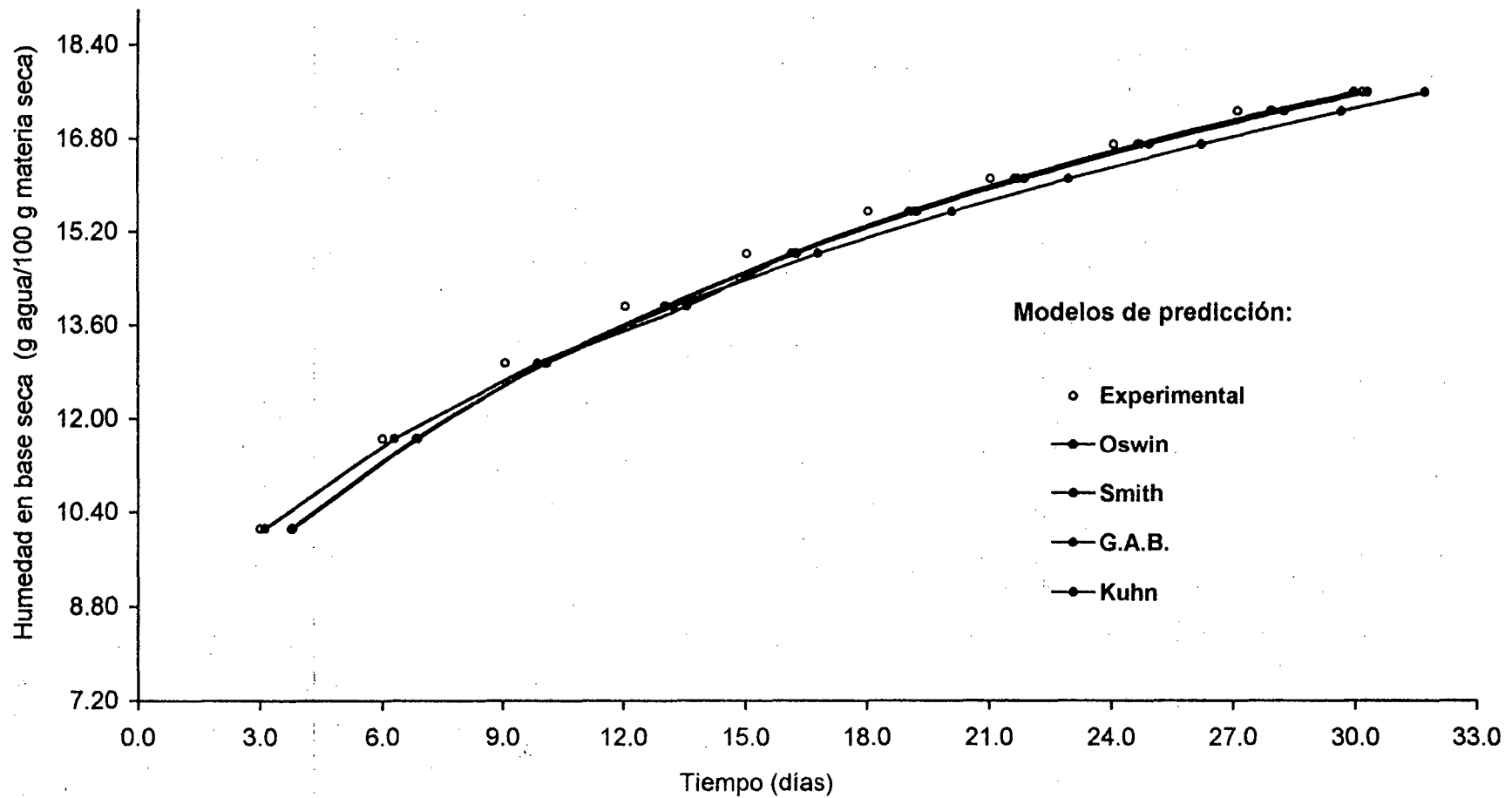
**Cuadro 13.** Valores de tiempo predichos por los modelos matemáticos deterministas, para la condición A.

Humedad en base seca (g agua/100 g ms)	Tiempo estimado mediante modelos matemáticos (días)			
	Oswin	Smith	G.A.B	Kuhn
10,1226	3,7652	3,8011	3,7691	3,1163
11,6662	6,8411	6,8772	6,8669	6,3029
12,9534	10,0744	10,0749	10,0988	9,8751
13,9341	13,0579	13,0041	13,0557	13,2272
14,8296	16,2649	16,1415	16,2132	16,8165
15,5494	19,2406	18,0511	19,1307	20,1013
16,1204	21,8947	21,6509	21,7290	22,9808
16,7112	24,9543	24,6589	24,7261	26,2335
17,2831	28,2624	27,9302	27,9764	29,6648
17,6076	30,3096	29,9672	29,9966	31,7429

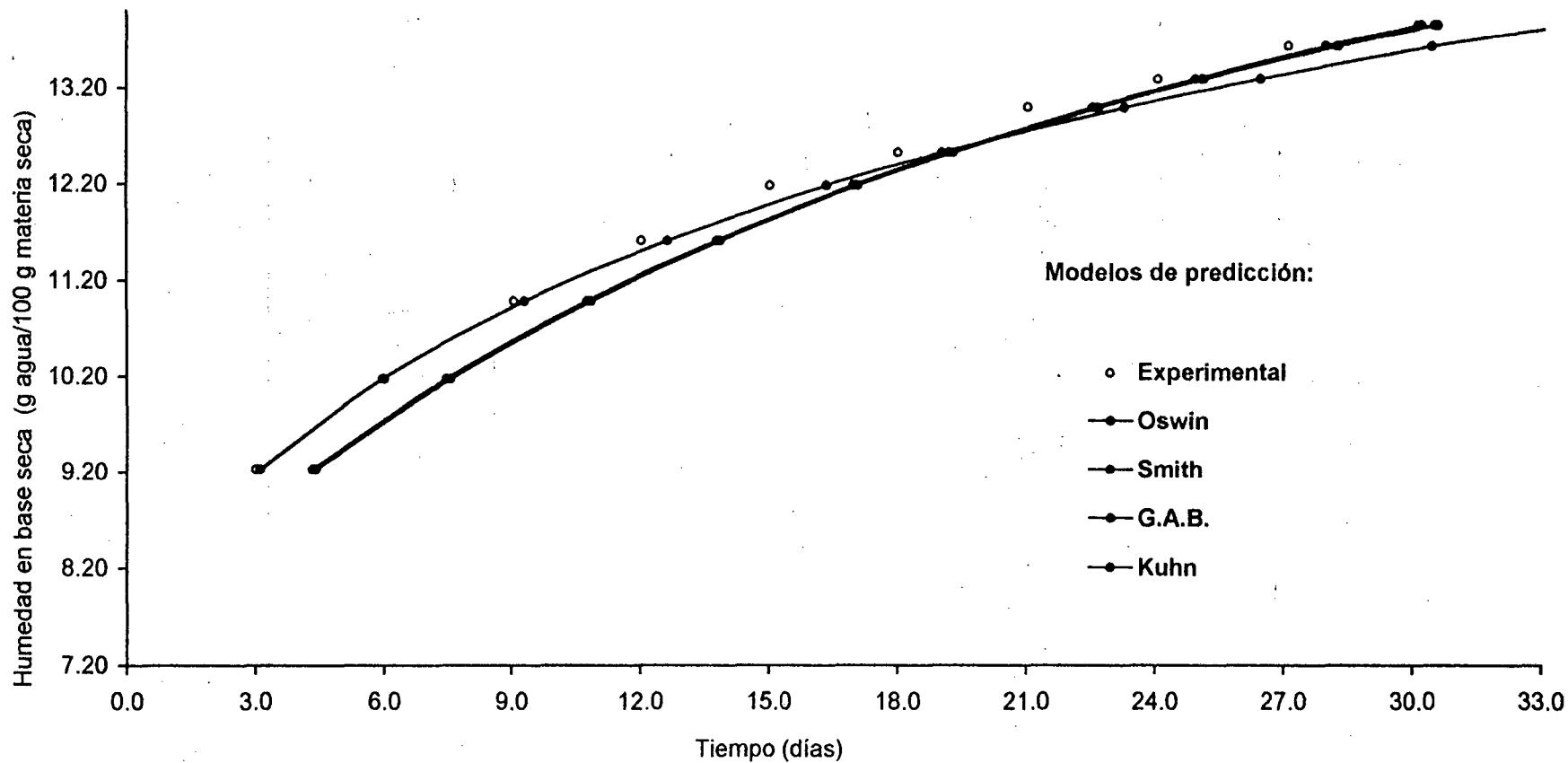
**Cuadro 14.** Valores de tiempo predichos por los modelos matemáticos deterministas, para la condición B.

Humedad en base seca (g agua/100 g ms)	Tiempo estimado mediante modelos matemáticos (días)			
	Oswin	Smith	G.A.B	Kuhn
9,2297	4,3340	4,3926	4,3186	3,150
10,1766	7,4780	7,5729	7,4958	5,9558
10,9888	10,7625	10,8699	10,8201	9,3099
11,6153	13,7828	13,8760	13,8686	12,6410
12,1834	16,9930	17,0447	17,0925	16,3765
12,6187	19,2163	19,2242	19,3137	19,0582
12,9984	22,6386	22,5570	22,7131	23,3106
13,2981	25,1143	24,9525	25,7130	26,4678
13,6392	28,2669	27,9857	28,2501	30,5736
13,8663	30,5992	30,2181	30,5253	33,6669

En las Figuras 11 y 12, se muestran los valores de variación de la humedad en base seca de la harina de plátano empacada, sometida a la condición A, experimental y estimado por los modelos matemáticos deterministas.



**Figura 11.** Variación de la humedad en base seca experimental y estimado por los modelos matemáticos, de la harina de plátano empacada, sometida a la condición A.



**Figura 12.** Variación de la humedad en base seca experimental y estimado por los modelos matemáticos, de la harina de plátano empacada, sometida a la condición B.

### **E. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE PREDICCIÓN DE GANANCIA DE HUMEDAD EN HARINA DE PLÁTANO EMPACADA**

Los valores del tiempo experimental y estimada, fueron sometidos a la prueba de Student corridas en el paquete estadístico Instat (Prueba t suponiendo medias iguales), para determinar la bondad de ajuste de los modelos matemáticos deterministas.

En el Cuadro 15, se muestran los valores de  $t$  y la aceptación de la hipótesis nula ( $H_0$ : no existe diferencia entre las medias de los valores de tiempos experimentales y los predichos por los modelos matemáticos deterministas). Se observa, de acuerdo al nivel de significancia, que los modelos matemáticos de Oswin, Smith, G.A.B y Kuhn son los que mejor predicen la ganancia de humedad en harina de plátano empacada.

**Cuadro 15.** Comparación t-student de los tiempos experimentales y los predichos por los modelos matemáticos ( $\alpha = 0,05$  y  $gl = 18$ ).

Modelos matemáticos	Estadístico t	Ho
<b>Condición A:</b>		
Oswin	0,2213	Aceptada
Smith	0,1610	Aceptada
G.A.B	0,1000	Aceptada
Kuhn	0,3391	Aceptada
<b>Condición B:</b>		
Oswin	0,3375	Aceptada
Smith	0,3281	Aceptada
G.A.B	0,3598	Aceptada
Kuhn	0,3402	Aceptada

## V. CONCLUSIONES

- Se predijo la ganancia de humedad en harina de plátano empacada empleando modelos matemáticos deterministas implementados, resueltos mediante la técnica numérica de Simpson en un programa para microcomputador.
- Los modelos matemáticos de sorción que mejor ajustan los valores de humedad de equilibrio de la harina de plátano empacada, son Oswin, Smith, G.A.B. y Kuhn.
- Los modelos matemáticos deterministas que mejor predicen la ganancia de humedad, son Oswin, Smith, G.A.B. y Kuhn.

## VI. RECOMENDACIONES

- Continuar la investigación para determinar la predicción de la vida útil, utilizando los modelos matemáticos optimizados como Oswin, Smith, G.A.B. y Kuhn.
- Generar datos de humedad de equilibrio de alimentos deshidratados de interés local, así como la permeabilidad de diferentes empaques, a fin de que puedan ser usados en el diseño completo del producto, desde la óptica de la estabilidad del alimento.
- Efectuar trabajos de investigación con alimentos de consumo local, cuya susceptibilidad a la humedad sea un factor de calidad influyente en su vida útil, evaluando la aplicabilidad del programa para microcomputador desarrollado.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

ASTM. 1984. Selected ASTM Standards on Packaging. Philadelphia. EEUU.  
233 p.

A.O.A.C. 1997. Official Methods of Analysis of the Association of Official  
Analytical Chemists. 15 ed. EEUU.

BADUI, D. 1993. Química de los Alimentos. 3 ed. Ed. Alhambra. México. 639 p.

BELL, L. N. y LABUZA, T. P., 2000. Aspectos prácticos de la isoterma de  
sorción y usos. 2da. Ed. EE.UU. 122 p.

BUREAU, G. y MULTON, J. L. 1995. Embalaje de los alimentos de gran  
consumo. Edit. Acribia. Zaragoza. España. 747 p.

BRUMOVSKY, J. y BRUMOVSKY, L. 1996. Evaluación de los métodos para  
determinar las constantes de la ecuación de la isoterma de G.A.B. CIDET  
(Centro de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico). España, Valencia.  
176-226 pp.

CARDOSO, G. Y LABUZA, T.P. 1983. Prediction of moisture gain and loss for  
packaged pasta subjected to a sine wave temperature/humidity  
environment. Journal of Food Technology, V 31, N° 5. 587-606 pp.

CARVALHO, S. M. y RIBEIRO, C. C. 1996. Modelagem matematica da  
isoterma de adsorcao de umidade a 25°C da farinha d'agua utilizando-se  
equacoes bi e tri-parametricas. Anales del Primer Congreso

- Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos. Campinas – Brasil.  
227-233 pp.
- COLLAZOS, P. 1993. La Composición de Alimentos de Mayor Consumo en el Perú. 6ta. ed. Ministerio de Salud. Lima, Perú. 63 p.
- CHEFTEL, J.C. y CHEFTEL, H. 1980. Introducción a a bioquímica y tecnología de los alimentos. Edit. Acribia. España. VI. 325 p.
- DIOSADY, L. L.; RIZVI, S. S. H.; KAI, W. y JAGDEO, D. J. 1996. Moisture Sorption Isotherms of canola meals, and Application to Packaging. Journal of Food Science. V 61 N° 1. 204-208 pp.
- FENNEMA, O. R. 1993. Química de los Alimentos. Edit. Acribia. Zaragoza. España. 1055 p.
- FLORES, H. 1988. Proyecto de instalación de un planta para elaboración de harina y chifles a partir del plátano. Tesis. FIA. Tingo María, Perú. 221 p.
- GILL, C. G. y GRIEGER-BLOCK. 1980. Kinetic data: Generation, interpretation, and use. Journal of Food Technology, V 28, N°13. 56-66 pp.
- HURTADO, F. 1986. Perspectivas para el aprovechamiento industrial del plátano. Seminario Taller sobre Producción de Plátano en la Selva Peruana. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). N° A3/PE-86-901. Lima, Perú. 25-150 pp.
- IBARZ, R. A.; BARBOSA, C. G. ; GARZA, G. S. Y GIMENO, A. V. 2000. Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria. Reducción de tamaño y tamizado. Edit. Acribia. Zaragoza, España. 225-232 pp.

- JIMENEZ, G. 1995. Predicción Computacional de la Vida Útil de las papas fritas. Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Recursos Naturales. Escuela de Alimentos. Chile. 48 p.
- KIM, S. ; KIM, D. ; SHIN, S. y, CHANG, K. 1999. Moisture Sorption Characteristics of Composite Foods Filled with Chocolate. *Journal of Food Science*, V 64, N° 2. 300-302 pp.
- LABUZA, T. P. 1982. Moisture gain and loss in packaged foods. *Journal of Food Technology*, V 30, N°6. 92-97 pp.
- - - - . 1996. Shelf Life Testing Short Course. Universidad Católica de Valparaíso. Escuela de Ingeniería de Alimentos. Chile. 14 p.
- - - - . 1999. Creation of Moisture Sorption Isotherms for Hygroscopic materials. <http://fscn.Che.umn.edu/Ted-Labuza/tpl.html>. 13 p.
- LENZ, M. K. y LUND, D. B. 1980. Experimental Procedures for determining Destruction Kinetics of Food Components. *Journal of Food Technology*, V 28, N°7. 51-55 pp.
- LIENDO, M. C. 1993. Ajuste de Isotermas de Adsorción de puré de papa y puré de camote en hojuelas mediante la utilización de Modelos de Sorción. Tesis Ing. Ind. Alimentarias. UNA. La Molina. 106 pp.
- MANLEY, J. L. 1989. Tecnología de la Industria Galletera. Galletas, Crackers y otros Horneados. Edit. Acribia. Zaragoza. España. 393-409 pp.
- MATOS, C. R. 1992. Evaluación de Modelos Matemáticos de Isotermas de Sorción en Oca (*Oxalis tuberosa* mol.), Olluco (*Ollucus tuberosus* loz.)

- algunos derivados. Tesis para optar el Grado de Magister Scientiae. UNA. La Molina. 120 p.
- MONTERREY, Q. E. y SOBRAL, P. J. A. 1998. Isoterma de sorcao de proteínas miofibrilares de tilapia do nilo a 15,25 y 35°C. XVI Congreso Brasileiro de Ciencia e Tecnología de Alimentos. Edit. Antonio de A. Figueiredo. SBCTA. Rio de Janeiro-Brasil. 2002-2005 pp.
- NIEVES, A. y DOMINGUEZ, F. C. 1996. Métodos Numéricos aplicados a la Ingeniería. Ed. Continental S.A. México 603 pp.
- PFEIFFER, C.; D'AUJOURD'HUI, M.; WALTER, J.; NUSSLI, J. Y ESCHER, F. 1999. Optimizing Food Packaging and Shelf Life. Journal Food Technology. V 53. N°6. 52-59 pp.
- SAGUY, I. y KAREL, M. 1980. Modeling of Quality Deterioration during Food Processing and Storage. Journal of Food Technology, V 28, N°4. 78-84 pp.
- SARAVACOS, G. ; TSIOURVAS, D. A y TSAMI, E. 1986. Effect of Temperature on Water Adsorption Isotherms of Sultana Raisins. Journal of Food Science, V 51, N° 2. 381-387 pp.
- SIMOES, L.Z y PITOMBO, R.N. 1998. Isotermas de Sorcao de Agua da carne bovina Liofilizada. XVI Congreso Brasileiro de Ciencia e Tecnología de Alimentos. Sociedade Brasileira de Ciencia e Tecnología de Alimentos. SBCTA-Regional do Rio de Janeiro. 2078-2081 pp.
- SMITH, J. M. 1995. Ingeniería de la Cinética Química. Edit. Continental S.A. México. 767 p.

SOTO, M. 1985. Bananos. Cultivo y Comercialización. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 649 p.

TORRES, A. 1991. Conceptos Modernos de Preservación de Alimentos en el Mercado norteamericano. Curso Universidad Agraria La Molina. Perú, Lima. 121 p.

TROLLER, J. y CHRISTIAN, J. 1978. Water Activity and Food. Academic Press. New York, San Francisco. 235 p.

## **VIII. ANEXOS**

## Anexo 1

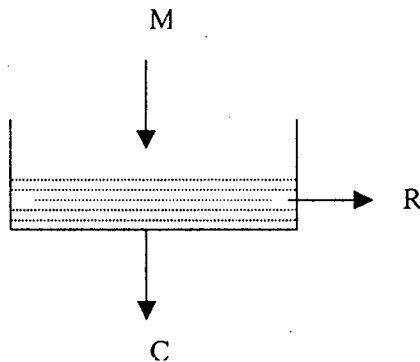
### **Método para el análisis granulométrico de la harina de plátano de acuerdo a la Correlación de Rosim, Rammler y Sperling (RRS)**

#### **Obtención de datos**

1. La distribución de tamaños se obtiene colocando una determinada cantidad de harina de plátano, de 100 a 200 g en el tamiz superior del conjunto de tamices, ordenado en forma decreciente de luz de malla y colocados en un vibrador eléctrico. La harina no debe presentar formación de grumos si es necesario realizar un breve secado.
2. Poner los tamices bajo vibración durante 5 minutos, y a continuación pesar el rechazo o fracción retenida por cada tamiz y calcular el porcentaje en relación con el peso de partida. Montar de nuevo el conjunto de tamices y hacerlos vibrar un minuto más. Pesar de nuevo el residuo y calcular su porcentaje, y si ha aumentado más del 1%, montar de nuevo los tamices y hacerlos vibrar durante otro minuto. Cuando el cambio en el porcentaje de finos que pasan en el periodo de un minuto cae por debajo del 1%, se puede dar por finalizado el tamizado. Anotar el tiempo total utilizado en el experimento.

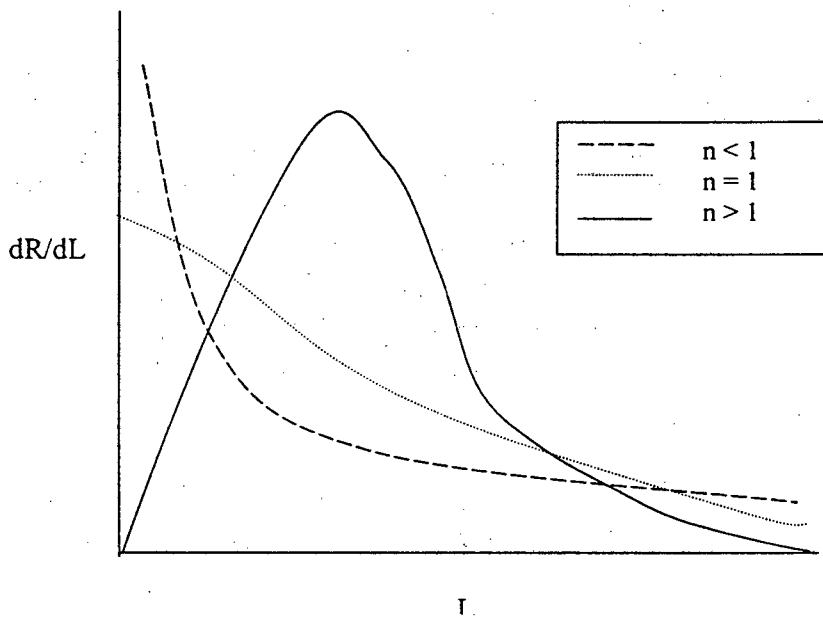
### Procesamiento de datos

Los datos se procesan utilizando ecuaciones que relacionan las fracciones de partículas retenidas con su tamaño, y ver cual de todas ellas presenta la máxima generalidad; utilizándose para efecto de cálculos la correlación de Rosin, Rammler y Sperlíng (RRS), que se describe a continuación: La cantidad de producto retenida por un tamiz se llama rechazo (R), y la no retenida ceniciento (C). El tamaño medio de rechazo (L) es la media aritmética de las luces de malla entre dicho tamiz y el superior. Ver Figura.



### Interpretación de parámetros

En la figura 13, se observa la curva de frecuencia de tamaños, donde se aprecia mejor la distribución de tamaños. El máximo de la curva indica el tamaño que aparece con más frecuencia:  $n$  es el índice de uniformidad de tamaños. Si la línea obtenida fuera vertical ( $n = \infty$ ), significa que se tiene un tamaño único, si fuera horizontal ( $n = 0$ ), se tendrán de todos los tamaños en la misma proporción. Si  $n = 1$  el máximo se produce para  $L = 0$ , lo que no tiene significado físico. Y si  $n < 1$  no hay máximo en la curva.



**Figura 13.** Curva de frecuencia de tamaños

Estas curvas de distribución muestran que la variación de R con la luz del tamiz es una función de L,  $DR/dL = \varphi(L)$ .

Del estudio de numerosas curvas obtuvieron una expresión de gran generalidad, cuya forma integrada resulta:

$$R_a = M \cdot \exp(-L/L')^n$$

Donde:

- M : Parámetro del modelo
- Ra : Valor de los rechazos acumulados
- L' : Tamaño medio estadístico
- n : Índice de uniformidad de tamaños

## Anexo 2

### **Método para la creación de Isotermas de sorción de humedad para materiales higroscópicos**

#### **Método del desecador**

1. Ocho a nueve desecadores con sales que generen actividades de agua de 0, 0,11, 0,33, 0,44, 0,54, 0,62, 0,75, 0,85 y 0,92 a diferentes temperaturas son recomendables para una isoterma completa.
2. Para productos secos, es recomendable el rango de 0-82% de humedad relativa con seis a ocho puntos. Para productos semi-húmedos usar humedades relativas de 50 a 92%.
3. Las soluciones de sales a emplear a altas temperaturas, deben ser preparadas a aquellas temperaturas para garantizar la saturación. Las soluciones deben presentar cristales cubiertas por una capa de líquido de 2 mm.

#### **Pesado de la muestra**

1. Pesar de 1 a 5 g de la muestra por duplicado o triplicado, en placas petri con una precisión de 0,0001g. Las placas son secadas, atemperadas en los desecadores y enfriadas en un desecador vacío durante 20 minutos, antes de ser pesadas.
2. Varias muestras pueden ser colocadas en el desecador, pero es recomendable no sobrecargar. Evitar colocar muestras que experimenten adsorción y desorción.

3. El volumen de la muestra debe ser, generalmente, menor de 1/20 del volumen del aire.
4. Pesar las muestras después de 21 días. Si las pesadas efectuadas a los 14 y 21 días no difieren en más de 1mg por gramo de sólido secos (error 0,1%), el experimento habrá culminado. Si el cambio es mayor –a altas actividades de agua-, continuar pesando. Una alternativa, es asumir que tres semanas es suficiente y pesar solamente una vez.
5. Para facilitar las pesadas, prevenir la condensación, y el problema de enfriamiento de las muestras a altas temperaturas; las muestras deben ser transferidas a un desecador vacío y dejar enfriar durante 20 minutos y enseguida pesar.

### Cálculo del contenido de humedad

El cálculo del contenido de humedad en el equilibrio al final del proceso de adsorción o desorción:

$$M = \frac{(w_1 - w_2) + \left(\frac{\%H_2O}{100}\right) * w_2}{w_1 * \left(\frac{100 - \%H_2O}{100}\right)}$$

Donde:

$w_1$  : Peso inicial

$w_2$  : Peso final

$\% H_2O$  : Humedad inicial de la muestra en base húmeda.

$M$  : Humedad de equilibrio en base seca.

### **Anexo 3**

## **Método adaptado para la determinación de permeabilidad al vapor de agua de empaques**

### **Generación de ambiente con diferentes humedades relativas y temperaturas**

Para la generación de humedades relativas constantes, se recurrió al uso de soluciones acuosas saturadas de sales colocada en el interior de un desecador. La temperatura, se mantuvo constante, mediante el empleo de una incubadora, en el cual se almacenaron los desecadores.

### **Sistema empaque-deseccante-ambiente**

El empaque fue acondicionado en recipientes de plástico, en cuyo interior se colocó el desecante ( $\text{CaCl}_2$ ), en tamaños que pasen un tamiz N°8 (2,36 mm) y libre de finos que pasen un tamiz N° 30 ( $600\mu\text{m}$ ).

### **Registro de Peso:**

Las muestras fueron pesadas a intervalos de 4 horas durante 3 - 4 días aproximadamente. Para ello, eran primero enfriadas en un desecador vacío durante 20 minutos.

**Calculo:**

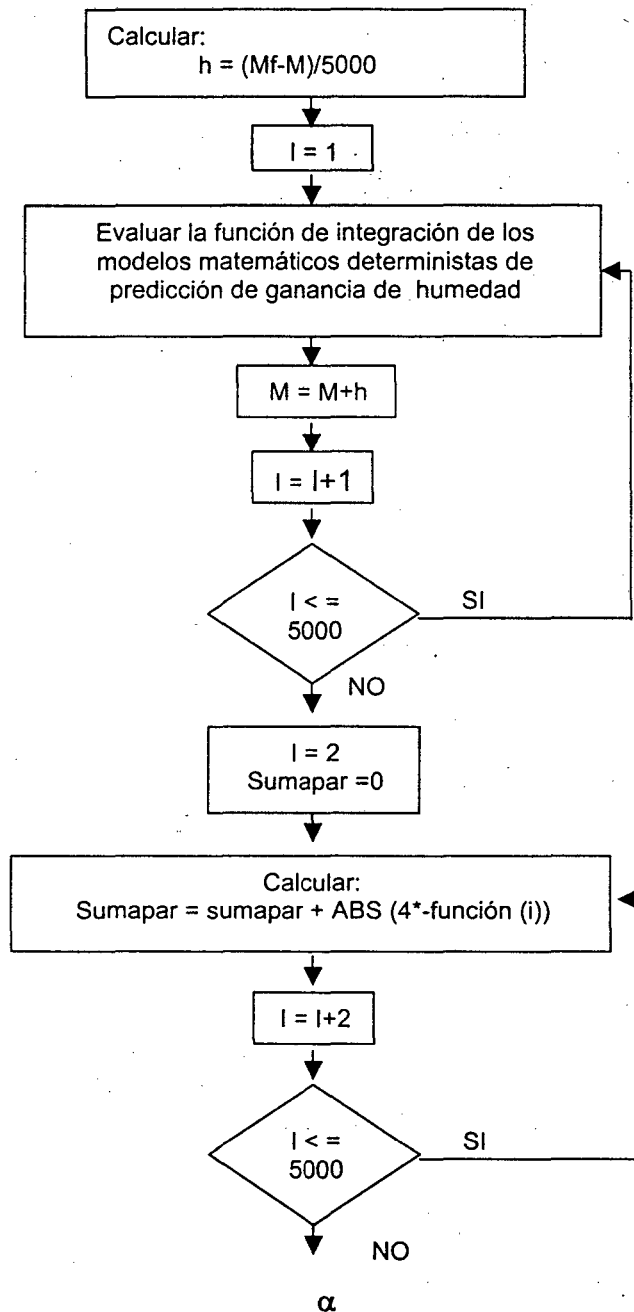
El cálculo de la permeabilidad al vapor de agua del empaque, se efectuó considerando los datos de ganancia de peso, área de exposición y la humedad relativa externa. Se desarrolló una macro en Microsoft Excel, el mismo que consideró para el cálculo la siguiente ecuación:

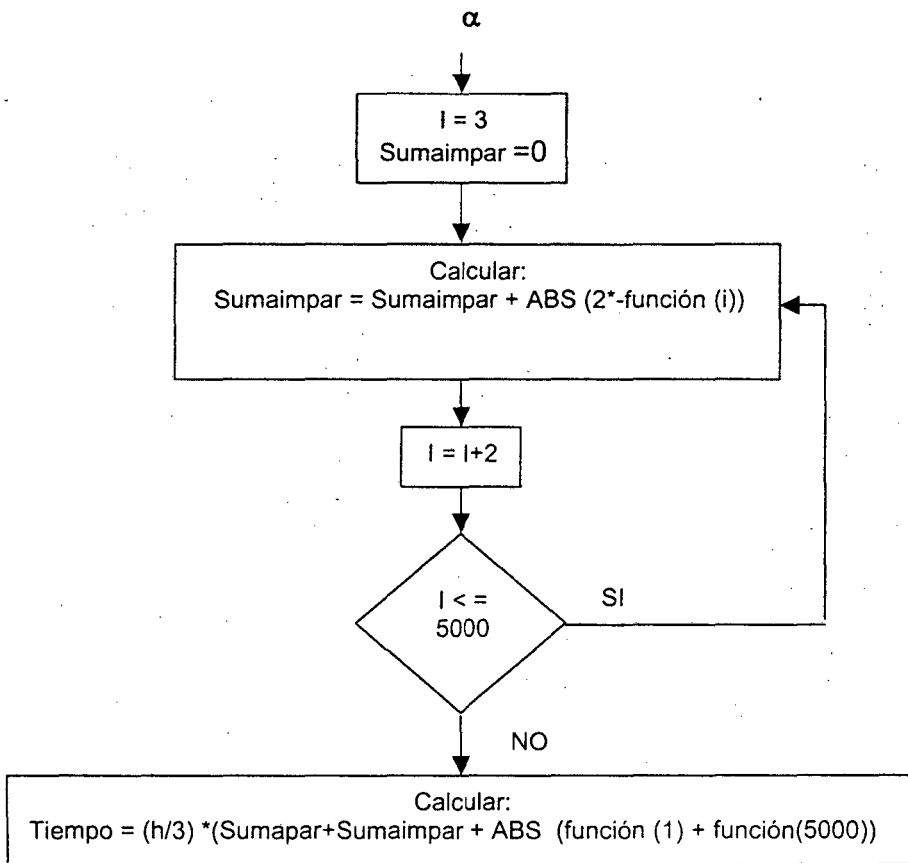
$$\frac{k}{x} = \frac{\text{Pendiente}}{A ( P_{ext} - P_{int} )}$$

Donde:

- $K/x$  : Permeabilidad al vapor de agua en g agua/día.m<sup>2</sup>.mmHg
- Pendiente : Obtenida mediante análisis de regresión lineal simple de los datos de ganancia de peso versus tiempo, el tramo lineal.
- A : Área de exposición del empaque, en contacto con el ambiente del desecador.
- $P_{ext}$  : Presión de vapor de agua externa, relacionado con la solución acuosa saturada.
- $P_{int}$  : Presión de vapor de agua al interior del empaque.

## Anexo 4

**Método numérico de SIMPSON para la predicción de ganancia de humedad en harina de plátano empacado**



- Me : Humedad de equilibrio en base seca de la harina de plátano estimada mediante los modelos matemáticos de sorción para la actividad de agua externa (Awe).
- Awe : corresponde a la fracción de la humedad relativa de almacenamiento.

### Anexo 5

#### Evaluación experimental en la determinación del análisis granulométrico de la harina de plátano

##### Pesos registrados en la obtención de datos experimentales

RECHAZOS (R)			
Diámetro Tamiz (mm)	R <sub>1</sub> (g)	R <sub>2</sub> (g)	R <sub>3</sub> (g)
1,000	0,10	0,10	0,10
0,710	0,30	0,50	0,70
0,425	0,50	0,90	1,10
0,250	6,10	6,30	6,20
0,125	14,30	13,90	12,80
0,106	7,60	6,90	6,50
0,053	19,90	18,20	18,00
0,000	51,20	53,20	54,60

R<sub>i</sub> : repeticiones

Peso inicial de la muestra = 100 g

Datos procesados de acuerdo al modelo matemático:

$$R_a = M \cdot \exp(-L/L')^n$$

RECHAZOS ACUMULADOS (Ra)				L	Ra estimado por el modelo
Ra <sub>1</sub>	Ra <sub>2</sub>	Ra <sub>3</sub>	Ra Promedio		
0,003	0,005	0,007	0,005	0,855	2,99599E-05
0,008	0,014	0,018	0,013	0,5675	0,001104949
0,069	0,077	0,080	0,075	0,3375	0,019805425
0,212	0,216	0,208	0,212	0,1875	0,130090682
0,288	0,285	0,273	0,282	0,1155	0,321090872
0,487	0,467	0,453	0,469	0,0795	0,504450834
0,999	0,999	0,999	0,999	0,0265	0,980969321

MODELO :  $R_a = M \cdot \text{Exp}(-L/L')^n$

REPLICA	Parámetros del modelo			
	M	L'	n	R <sup>2</sup>
1	1,360225	0,055401	0,6785	98,587
2	1,362783	0,054587	0,67999	98,131
3	1,382403	0,078935	1,02371	97,956
Promedio	1,367961	0,054911	0,689051	98,242
SEM	0,007005	0,007984	0,114822	

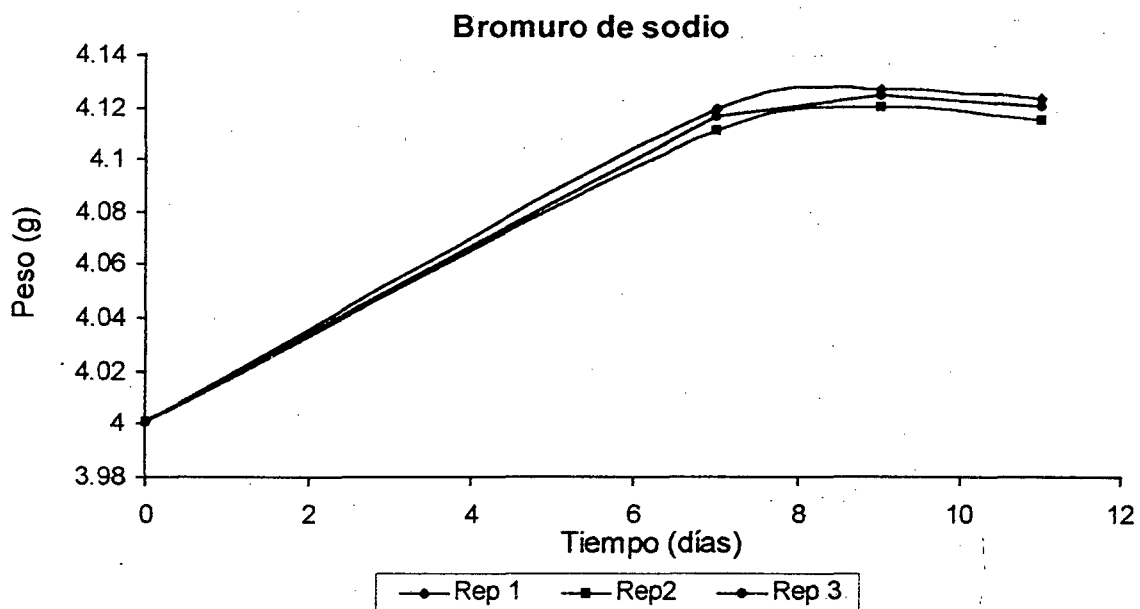
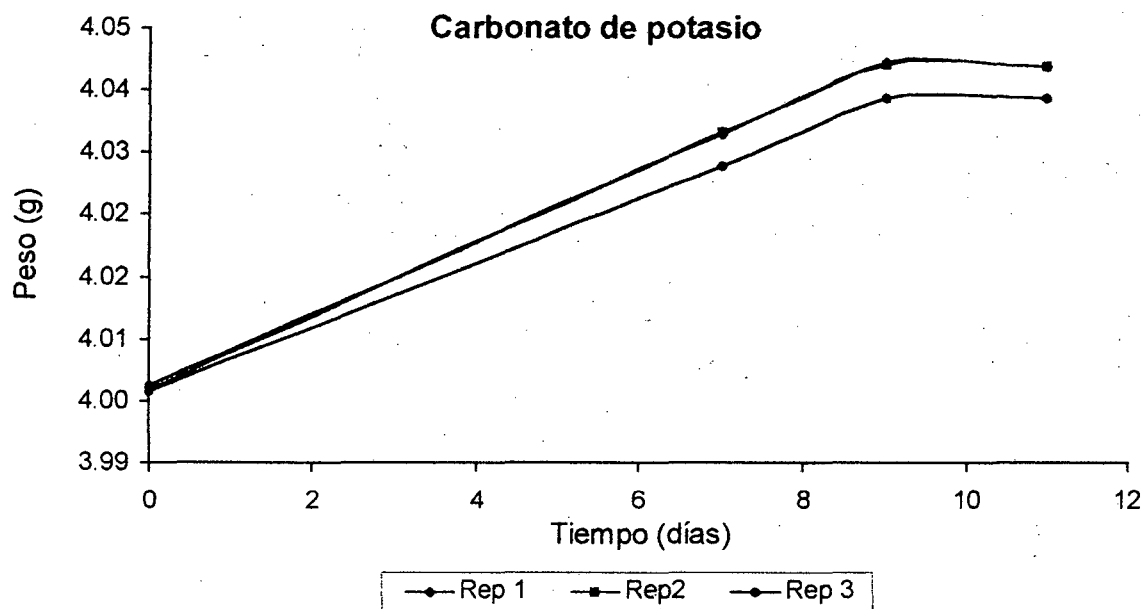
## Anexo 6

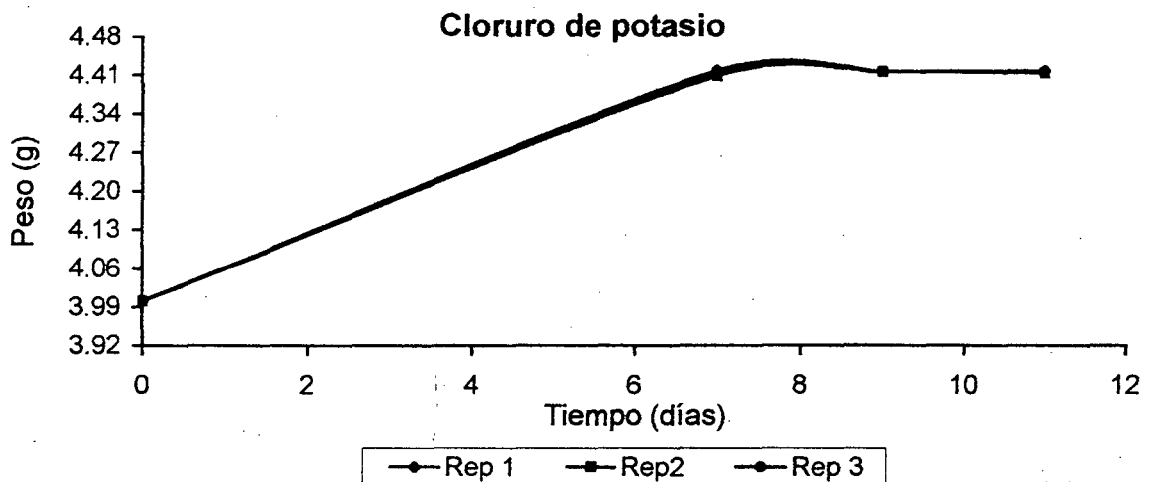
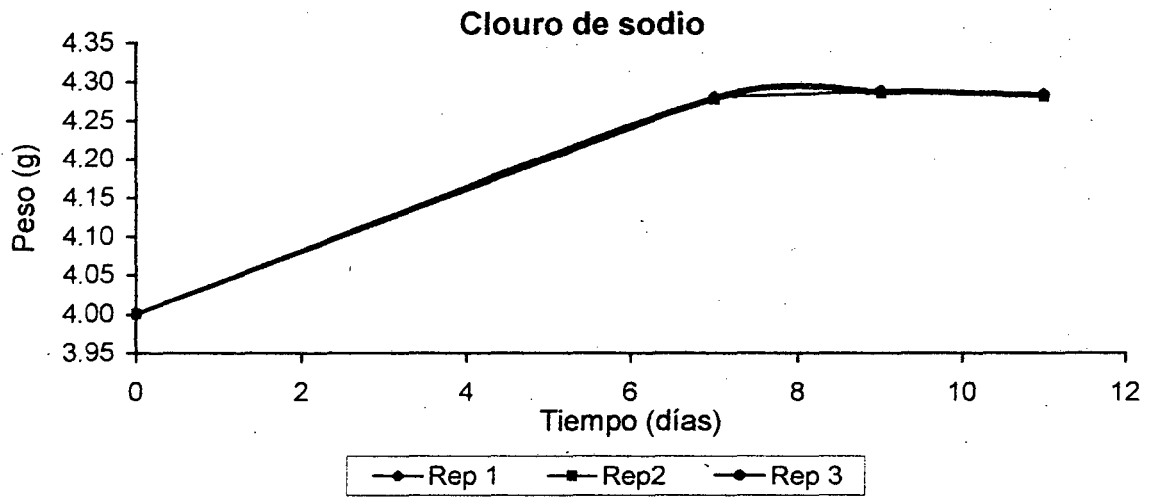
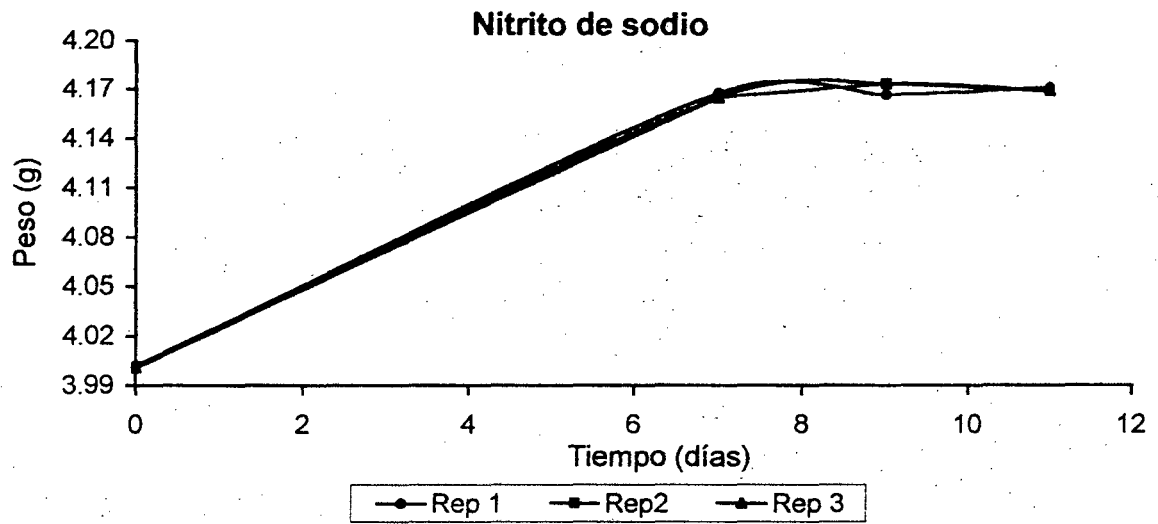
**Evaluación experimental para la determinación de la isoterma de  
adsorción**

**Pesos registrados en la ganancia de humedad obtenidos en el tiempo**

Sales	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso
Saturadas	Placa	Muestra	0 días	7 días	9 días	11 días
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	41,7077	4,0021	45,7098	45,7421	45,7514	45,7508
	42,0273	4,0015	46,0288	46,062	46,0706	46,0705
	43,7136	4,0013	47,7149	47,744	47,7527	47,7527
NaBr	43,4504	4,0014	47,4518	47,5702	47,5779	47,5736
	42,7297	4,0014	46,7311	46,8408	46,8504	46,8451
	42,2365	4,0012	46,2377	46,3535	46,3616	46,3569
NaNO <sub>2</sub>	43,3736	4,0022	47,3758	47,5419	47,5408	47,545
	41,7928	4,0014	45,7942	45,9583	45,9667	45,9619
	41,9103	4,001	45,9113	46,0756	46,0844	46,0799
NaCl	42,3708	4,001	46,3718	46,652	46,6599	46,6556
	43,6964	4,0001	47,6965	47,9732	47,9816	47,977
	41,7879	4,0011	45,789	46,0684	46,076	46,0718
KCl	43,5407	4,0012	47,5419	47,9547	47,9588	47,9586
	41,9989	4,0016	46,0005	46,4086	46,4162	46,4124
	42,6319	4,0011	46,633	47,0505	47,0498	47,0485

Variación experimental de la ganancia de humedad en la isoterma de sorción de la harina de plátano a 29,2°C.





## Anexo 7

**Ecuaciones de regresión para el cálculo de la humedad relativa y actividad  
de agua de soluciones acuosas saturadas**

<b>Soluciones saturadas</b>	<b>Ecuación de regresión</b>
Carbonato de potasio	$\text{Ln}A_w = \frac{145,00}{T} - 1,30$
Bromuro de sodio	$\text{Ln}A_w = \frac{492,00}{T} - 2,203$
Nitrito de sodio	$\text{Ln}A_w = \frac{435,96}{T} - 1,88$
Cloruro de sodio	$\text{Ln}A_w = \frac{228,92}{T} - 1,04$
Cloruro de potasio	$\text{Ln}A_w = \frac{367,58}{T} - 1,39$
Sulfato de amonio	$\text{Ln}A_w = \frac{77,82}{T} - 0,47$
Nitrato de potasio	$\text{Ln}A_w = \frac{342,91}{T} - 1,21$

### Anexo 8

#### Análisis de varianza de la regresión no lineal de los modelos matemáticos de sorción de humedad

##### Modelo G.A.B.

F. V.	G. L.	S. C.	C.M	Fc
Regresión	3	912,50869	304,16965	5992,3098
Residual	2	0,05076	0,02538	
Total corregido	5	912,55973		

$$R \text{ squared} = 1 - \text{Residual SS} / \text{Corrected SS} = 0,99918 = 99,918\%$$

##### Modelo Smith

F. V.	G. L.	S. C.	C.M	Fc
Regresión	2	912,49949	456,24974	7573,8668
Residual	3	0,06024	0,02008	
Total corregido	5	912,55973		

$$R \text{ squared} = 1 - \text{Residual SS} / \text{Corrected SS} = 0,99903 = 99,903\%$$

**Modelo Oswin**

F. V.	G. L.	S. C.	C.M	Fc
Regresión	2	912,51370	456,25685	9914,3166
Residual	3	0,04602	0,01534	
Total corregido	5	912,55973		

R squared = 1 - Residual SS / Corrected SS = 0,99926 = 99,926%

**Modelo Kuhn**

F. V.	G. L.	S. C.	C.M	Fc
Regresión	2	910,99529	455,49765	291,1588
Residual	3	1,56443	0,52148	
Total corregido	5	912,55973		

R squared = 1 - Residual SS / Corrected SS = 0,97481 = 97,481%

**Modelo Lineal**

F. V.	G. L.	S. C.	C.M	Fc
Regresión	2	910,24393	455,12197	175,8477
Residual	3	2,58816	0,86272	
Total corregido	5	912,83209		

R squared = 1 - Residual SS / Corrected SS = 0,96062 = 96,062%

### Anexo 9

Cálculo del porcentaje de la raíz cuadrada del error medio relativo (%RSM) para la bondad de ajuste de los modelos

de sorción de humedad  $\%RSM = 100 \sqrt{\frac{\sum ((M_{\text{experimental}} - M_{\text{estimada}}) / M_{\text{experimental}})^2}{\text{Número de datos experimentales}}}$

GAB	((Mexp.-Mest.) /Mexp.) <sup>2</sup>	SMITH	((Mexp.-Mest.) /Mexp.) <sup>2</sup>	OSWIN	((Mexp.-Mest.) /Mexp.) <sup>2</sup>	KUHN	((Mexp.-Mest.) /Mexp.) <sup>2</sup>	LINEAL	((Mexp.-Mest.) /Mexp.) <sup>2</sup>
8,67811	0,0000508	8,60474	0,0000019	8,68263	0,0000585	9,41479	0,0085788	7,92140	0,0065112
10,53713	0,0002832	10,57207	0,0001841	10,58988	0,0001418	10,53063	0,0003040	10,92840	0,0003872
12,18388	0,0000155	12,25118	0,0000899	12,18828	0,0000185	11,70515	0,0012610	12,96912	0,0047114
15,14179	0,0000001	15,15831	0,0000022	15,03263	0,0000467	14,39706	0,0023840	15,62944	0,0010623
18,66672	0,0000007	18,62320	0,0000101	18,72018	0,0000040	19,16185	0,0006580	17,76114	0,0024327
<b>% RSM</b>	<b>0,83714</b>		<b>0,75925</b>		<b>0,73430</b>		<b>5,13532</b>		<b>5,49633</b>

La humedad estimada (Mest.) se obtiene reemplazando los valores de  $A_w$  y los parámetros encontrados anteriormente en los modelos matemáticos.

## Anexo 10

### Evaluación experimental de la permeabilidad al vapor de agua del empaquete de la harina de plátano

#### Condición A:

#### Características del empaque y condiciones para la determinación de la permeabilidad

Temperatura (°C)	29,2000	
Area de exposición (m <sup>2</sup> )	0,00717	
Espesor del empaque (mm)	0,00600	
Humedad relativa interna	0,00000 %	
Humedad relativa externa	92.,187 %	
Presión de vapor (mmHg)	30,1270	Ec. Cardoso y Labuza (1983)

#### Pesos registrados en la determinación de la permeabilidad, en el tiempo

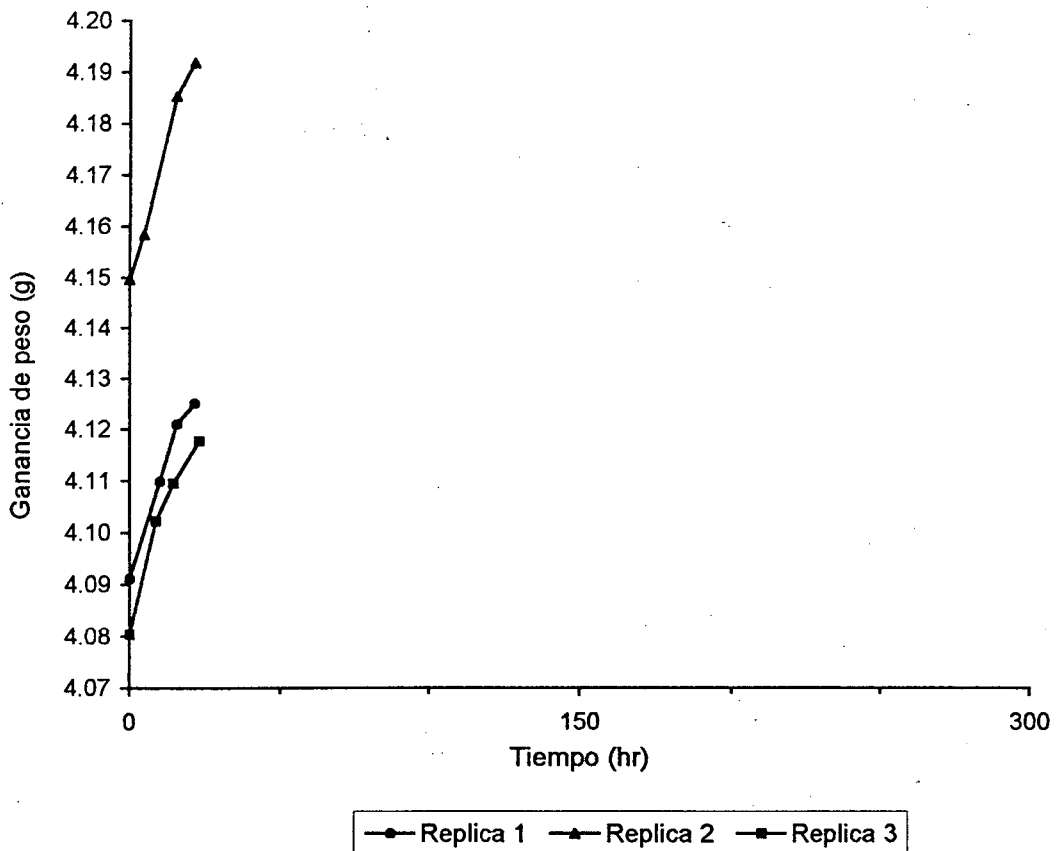
Replica1		Replica 2		Replica 3	
Tiempo (hr)	Peso (g)	Tiempo (hr)	peso (g)	Tiempo (hr)	Peso (g)
0,0000	4,0912	0,0000	4,1495	0,0000	4,0803
10,0167	4,1099	4,7500	4,1584	8,8500	4,1022
15,5667	4,1210	15,5667	4,1853	14,5170	4,1095
21,5667	4,1251	21,5667	4,1918	23,1500	4,1177

**Parámetros calculados para la determinación de la permeabilidad a través de regresión lineal de los datos experimentales**

Réplicas	Pendiente	intersección	r2
Réplica 1	0,0019	4,0911	0,9997
Réplica 2	0,0023	4,1486	0,9963
Replica 3	0,0021	4,0813	0,9761

El cálculo se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{k}{x} = \frac{\text{Pendiente}}{A(P_{ext} - P_{int})} \longrightarrow K_w = \frac{\text{Pendiente} * 24}{A * P_v \left( \frac{HR_e - HR_i}{100} \right)}$$



**Condición B:****Características del empaque y condiciones para la determinación de la permeabilidad**

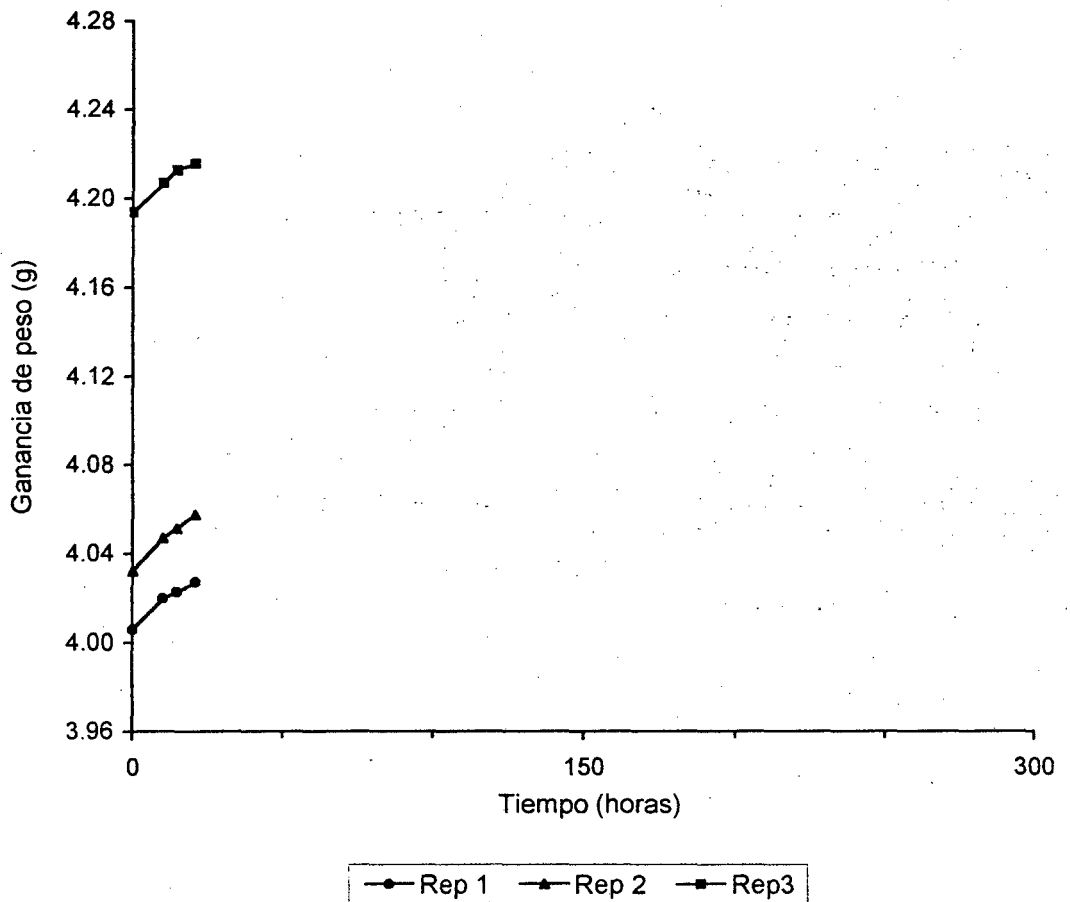
Temperatura (°C)	29,2000	
Area de exposición (m <sup>2</sup> )	0,00714	
Espesor del empaque (mm)	0,00600	
Humedad relativa interna	0,00000 %	
Humedad relativa externa	80,6888 %	
Presión de vapor (mmHg)	30,1270	Ecuación Cardoso y Labuza (1983).

**Pesos registrados en la determinación de la permeabilidad, en el tiempo**

Tiempo	Replica 1	Replica 2	Replica 3
0,0000	4,0060	4,0323	4,1934
10,0667	4,0199	4,0471	4,2067
14,6500	4,0228	4,0513	4,2123
20,6167	4,0271	4,0575	4,2153

**Parámetros calculados para la determinación de la permeabilidad a través de regresión lineal de los datos experimentales**

Réplicas	Pendiente	intersección	r <sup>2</sup>
Réplica 1	0,0012	4,0065	0,9781
Réplica 2	0,0013	4,0326	0,9903
Replica 3	0,0013	4,1935	0,9997



**Permeabilidad al vapor de agua del empaque de la harina de plátano  
a 29.2°C**

REPLICA	Sales saturadas	
	KNO <sub>3</sub> HR: (92.4187 %) <sup>(*)</sup>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HR: (80.6888%) <sup>(*)</sup>
1	0,2340	0,1641
2	0,2765	0,1835
3	0,2457	0,1793
Promedio	0,2521	0,1757
SEM	0,0127	0,0059

## Anexo 11

### Programas en microcomputador para predecir la ganancia de humedad de la harina de plátano empacada, mediante modelos matemáticos

#### 1. Programa que considera el modelo de sorción de humedad de G.A.B.

##### OBJETO:

Información del producto	
<b>PRODUCTO:</b>	
Humedad en base húmeda (g agua/100muestra)	<input type="text" value="7,01"/>
Peso del producto (g)	<input type="text" value="4,0071"/>
<b>EMPAQUE:</b>	
Permeabilidad al vapor de agua(g agua/m <sup>2</sup> .día.mmhg)	<input type="text" value="0,2521"/>
Area de exposición (m <sup>2</sup> )	<input type="text" value="0,0071"/>
<b>CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO</b>	
Temperatura (°C)	<input type="text" value="29,2"/>
Humedad relativa	<input type="text" value="92,418"/>
<input type="button" value="Aceptar"/> <input type="button" value="Cancelar"/>	

##### CODIGO:

Rem "Ingresan los datos de T° y HR del ambiente, peso y hbh del producto, permeabilidad y área del empaque"

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
    hbh = CDb1(Text1.Text)
```

```
    peso = CDb1(Text2.Text)
```

```
    kw = CDb1(Text3.Text)
```

```
    area = CDb1(Text4.Text)
```

```
    temp = CDb1(Text5.Text)
```

```
    hr = CDb1(Text6.Text)
```

```
    tabs = temp + 273
```

```
    ms = peso - (hbh / 100) * peso
```

```
    p = Exp(20.77905 - (5250.31) / (temp + 273))
```

Awe = hr / 100

Mi = ((hbh) / (100 - hbh)) \* 100

Producto.Hide

End Sub

### OBJETO:

Predicción de ganancia de humedad		
MODELO DE SORCION DE G.A.B.		
PARAMETROS	Mo	6,0095
	K	0,8143
	C	22,4284
GANANCIA DE HUMEDAD		
	13,9341	13,0557
% de humedad en base seca final		Tiempo (días)
		Cancelar

### CODIGO:

Rem "Calcula el tiempo necesario para alcanzar un cierto nivel de humedad, haciendo uso del modelo de sorción de G.A.B. para estimar la actividad de agua "

Private Sub Command2\_Click()

Producto.Hide

End Sub

Private Sub Command1\_Click()

Dim s As Double

Mo = CDbI(Text1.Text)

K = CDbI(Text2.Text)

C = CDbI(Text3.Text)

Mf = CDbI(Text4.Text)

fi = (kw \* area \* p \* 100) / (2 \* K \* (1 - C) \* ms)

$$\text{Mex} = (\text{Mo} * \text{K} * \text{C} * \text{Awe}) / ((1 - \text{K} * \text{Awe}) * (1 - \text{K} * \text{Awe} + \text{K} * \text{C} * \text{Awe}))$$

$$\text{beta} = (\text{Mo} / \text{Mex}) * \text{C} - ((2 + (\text{Mo} / \text{Mex}) * \text{C} - \text{C})^2 - 4 + 4 * \text{C})^{(0.5)}$$

$$h = (\text{Mf} - \text{Mi}) / 5000$$

$$M = \text{Mi}$$

For i = 1 To 5000

$$s = ((2 + (\text{Mo} / M) * \text{C} - \text{C})^2 - 4 + 4 * \text{C})^{0.5}$$

$$\text{Array\_fun}(i) = (1 / \text{fi}) * ((1) / (\text{beta} - (\text{Mo} / M) * \text{C} + s))$$

$$M = M + h$$

Next

Call integracion

Text5.Text = Str(tiempo)

End Sub

Private Sub Command2\_Click()

Gabhum.Hide

End Sub

Private Sub Label1\_Click()

End Sub

Private Sub Label4\_Click()

End Sub

Private Sub Label6\_Click()

End Sub

Private Sub Text1\_Change()

End Sub

## 2. Programa que considera el modelo de sorción de humedad de KUHN

### OBJETO:

Predicción de ganancia de humedad	
<b>MODELO DE SORCION DE KUHN</b>	
<b>PARAMETROS</b>	<b>A</b> <input type="text" value="-2,1471"/>
	<b>B</b> <input type="text" value="6,7966"/>
<b>GANANCIA DE HUMEDAD</b>	
<input type="text" value="13,9341"/>	<input type="text" value="13,2272"/>
% de humedad en base seca final	Tiempo (días)
<input type="button" value="Cancelar"/>	

### CODIGO:

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
    Ak = CDbI(Text1.Text)
```

```
    Bk = CDbI(Text2.Text)
```

```
    Mf = CDbI(Text4.Text)
```

```
    fi = (kw * area * p * 100) / (ms)
```

```
    Mex = Bk + Ak / (Log(Awe))
```

```
    beta = Exp((Ak) / (Mex - Bk))
```

```
    h = (Mf - Mi) / 5000
```

```
    M = Mi
```

```
    For i = 1 To 5000
```

```
        Array_fun(i) = 1 / (fi * (beta - (Exp((Ak) / (M - Bk))))))
```

```
        M = M + h
```

```
    Next
```

```
    Call integracion
```

```
    Text5.Text = Str(tiempo)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()
```

Kuhnhum.Hide

End Sub

Private Sub Label1\_Click()

End Sub

Private Sub Text4\_Change()

End Sub

### 3. Programa que considera el modelo de sorción de humedad de OSWIN

OBJETO:

Predicción de ganancia de humedad	
<b>MODELO DE SORCION DE OSWIN</b>	
<b>PARAMETROS</b>	t <input type="text" value="9,5646"/>
	S <input type="text" value="0,4038"/>
<b>GANANCIA DE HUMEDAD</b>	
<input type="text" value="13,9341"/>	<input type="text" value="13,0579"/>
% de humedad en base seca final	Tiempo (días)
<input type="button" value="Cancelar"/>	

CODIGO:

Rem "Idem G.A.B."

Private Sub Command1\_Click()

tosw = CDbI(Text1.Text)

Sosw = CDbI(Text2.Text)

Mf = CDbI(Text4.Text)

fi = (kw \* area \* p \* 100) / (ms)

Mex = tosw \* (((Awe) / (1 - Awe)) ^ (Sosw))

beta = ((Mex / tosw) ^ (1 / Sosw)) / (1 + (Mex / tosw) ^ (1 / Sosw))

h = (Mf - Mi) / 5000

M = Mi

```

For i = 1 To 5000
    teta = ((M / tosw) ^ (1 / Sosw)) / (1 + (M / tosw) ^ (1 / Sosw))
    Array_fun(i) = (1) / (fi * (beta - teta))
    M = M + h
Next
Call integracion
Text5.Text = Str(tiempo)
End Sub
Private Sub Command3_Click()
Oswinhum.Hide
End Sub
Private Sub Label1_Click()
End Sub

```

**4. Programa que considera el modelo de sorción de humedad de SMITH**  
**OBJETO:**

Predicción de ganancia de humedad		
MODELO DE SORCION DE SMITH		
PARAMETROS	A	<input type="text" value="3,9734"/>
	B	<input type="text" value="7,9777"/>
GANANCIA DE HUMEDAD		
<input type="text" value="13,9341"/>	<input type="text" value="13,0041"/>	
% de humedad en base seca final	Tiempo (días)	
<input type="button" value="Cancelar"/>		

**CODIGO:**

**Rem "Idem G.A.B."**

```

Private Sub Command1_Click()
    Asm = CDb(Text1.Text)

```

```

Bsm = CDbI(Text2.Text)
Mf = CDbI(Text3.Text)
fi = (kw * area * p * 100) / (ms)
Mex = Asm - Bsm * Log(1 - Awe)
beta = Exp((Asm - Mex) / (Bsm))
h = (Mf - Mi) / 5000
M = Mi
For i = 1 To 5000
    Array_fun(i) = 1 / (fi * (Exp((Asm - M) / (Bsm)) - beta))
    M = M + h
Next
Call integracion
Text4.Text = Str(tiempo)
End Sub
Private Sub Command3_Click()
    Smithum.Hide
End Sub
Private Sub Label1_Click()
End Sub

```

## MODULOS

### Simpson: Método de integración numérica

Rem “Este procedimiento efectúa la integración de los modelos de predicción de ganancia de humedad mediante Simpson”

```
Sub integracion()
```

```
i = 2
```

```
sumapar = 0
```

```
Do
```

```
    sumapar = Abs(4 * Array_fun(i)) + sumapar
```

```
    i = i + 2
```

```
Loop Until i >= 5000
```

```
i = 3
```

```
sumaimpar = 0
```

```
Do
```

```
    sumaimpar = Abs(2 * Array_fun(i)) + sumaimpar
```

```
    i = i + 2
```

```
Loop Until i >= 5000
```

```
tiempo = (h / 3) * (sumapar + sumaimpar + Abs(Array_fun(1)) +
```

```
Abs(Array_fun(5000)))
```

```
End Sub
```

## VARIABLES

**Rem "En esta parte se declara las variables globales a utilizarse en el programa"**

```
Global Ak, Asm, tosw, Bk, Bsm, Sosw, C, K, Mo As Double
```

```
Global hbh, peso, temp, tabs, hr, ms, kw, area, fi, beta, Awe, Awc, Mex,
```

```
sumapar, sumaimpar, tiempo, h, M, Mi, Mf, p As Double
```

```
Global i As Integer
```

```
Global Array_fun(1 To 5000) As Double
```