

9



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES  
TERMODINÁMICAS DE SORCIÓN EN CEREAL DE  
MAÍZ EN HOJUELA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A :

ALEJANDRA ROSAS GARCÍA

25/11/74

ASESORA: M. C. MARÍA DE LA LUZ ZAMBRANO ZARAGOZA

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO

2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

UNIVERSIDAD NACIONAL  
 AUTÓNOMA DE  
 MEXICO

U. N. A. M.  
 ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS  
 SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de  
 Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
 PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen Garcia Mijares  
 Jefe del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Estudio de las Propiedades Termodinámicas de Sorción en Cereal de Maíz en Hojuelas.

que presenta la pasante: Alejandra Rosas García  
 con número de cuenta: 8928605-8 para obtener el TITULO de:  
Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 12 de abril de 199 9

PRESIDENTE	<u>I. Q. Fernando Maya Servín</u>	
VOCAL	<u>M. en C. Rosa M. Arriaga Orihuela</u>	
SECRETARIO	<u>M. en C. Ma. de la Luz Zambrano Zaragoza</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>I. A. Laura M. Cortazar Figueroa</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>I. A. Francisco J. López Martínez</u>	

AGRADEZCO EN PRIMER LUGAR

A DIOS POR DARMELAVIDA.

TE AGRADEZCO PAPA POR TODO TU AMOR,  
TU CONFIANZA , TU APOYO Y POR CREER EN MI.

TE AGRADEZCO MAMA POR SER MI AMIGA,  
MI COMPLICE Y POR HABERME DADO TANTO  
AMOR EN TODO EL TIEMPO QUE ESTUVIMOS  
JUNTAS.

Y MUY ESPECIALMENTE LE DOY GRACIAS A LUZ  
QUE ME OFRECIO UNA AMISTAD SINCERA, ASI COMO  
TODO SU APOYO CONFIANZA Y PACIENCIA.

DEDICO ESTA TESIS A  
LOS DOS SERES QUE  
MAS AMO EN LA VIDA.  
USTEDES PAPAS,

# INDICE

<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
Objetivo General	
Objetivo Particular I	2
Objetivo Particular II	2
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
<b>1.1 AGUA UNIDA Y ACTIVIDAD DE AGUA</b>	<b>3</b>
1.1.1 Actividad de Agua	3
1.1.2 Tipos de agua	7
<b>1.2. METODOS PARA LA DETERMINACION DE ACTIVIDAD DE AGUA</b>	<b>8</b>
<b>1.3. ISOTERMAS DE SORCION DE HUMEDAD</b>	<b>9</b>
1.3.1. Tipos de Isotermas de Sorción de Humedad según los componentes constituyentes del alimento.	10
1.3.2. Isotermas de Adsorción y Estado del Agua en los Alimentos.	14
1.3.3. Importancia de las isotermas de sorción en el procesamiento y conservación de alimentos.	15
<b>1.4. METODOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS DE SORCIÓN</b>	<b>17</b>
1.4.1. Métodos Gravimétricos.	17
<b>2. MATERIALES Y METODOS</b>	
<b>2.1. CUADRO METODOLOGICO</b>	<b>19</b>
<b>2.2. MATERIALES</b>	<b>20</b>
2.2.1. Harina de Cereal de Maíz en Hojuela	20
2.2.2. Preparación de las Sales	20
2.2.3. Determinación de Humedad del Cereal de Maíz en Hojuela	20
<b>2.3. ISOTERMA DE SORCION DE HUMEDAD</b>	<b>21</b>
2.3.1. Isoterma de Adsorción de Humedad	21
2.3.2. Isoterma de Desorción de Humeidad	22
<b>2.4 METODO MATEMATICO DE OBTENCION DE ISOTERMAS DE SORCION DE HUMEDAD</b>	<b>22</b>
<b>2.5 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS</b>	<b>24</b>

<b>3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>25</b>
3.1 ANALISIS QUIMICO PROXIMAL	25
3.2 ISOTERMAS DE SORCION DE HUMEDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS	25
3.2.1 Isotermas de Adsorción	26
3.2.2 Isotermas de Desorción	28
3.2.3 Comparación de Adsorción y Desorción	29
3.3 VALORES DE MONOCAPA PARA BET, GAB Y OTROS MODELOS	31
3.3.1 Valores de Humedad de Monocapa	33
3.4 PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL AGUA EN CEREAL DE MAIZ EN HOJUELA	35
3.4.1 Calores de Sorción	35
3.4.2 Entalpías de Sorción	38
3.4.3 Energía Libre de Gibbs	40
3.4.4 Entropía de Sorción	42
CONCLUSIONES	44
BIBLIOGRAFIA	46

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Tipos de agua en los alimentos	pag 8
Cuadro 2	Solubilidad aproximada de Sales Creados de Microclimas	20
Cuadro 3	Actividad de Agua de las sales utilizadas y su $a_w$ teórica a 25°C	21
Cuadro 4	Escala de calificación de ajuste de calidad medido por el RMS	24
Cuadro 5	Valores del Análisis Químico Proximal de Cereal de Maíz en Hojuela	25
Cuadro 6	Valores de RMS y ERROR% en Isotermas de Adsorción	31
Cuadro 7	Valores de RMS y ERROR% en Isotermas de Desorción	33
Cuadro 8	Valores de Humedad de Monocapa para Adsorción	33
Cuadro 9	Valores de Humedad de Monocapa para Desorción	34
Cuadro 10	Valores de Adsorción/Desorción : Calores y Entalpías	39



## INDICE DE FIGURAS

	Página	
Figura 1	Isoterma de Diversos Alimentos y sus Materias Constitutivas	13
Figura 2	Isoterma General de Adsorción de agua en alimentos (20°C)	15
Figura 3	Estabilidad de los Alimentos Basandose en su Actividad de Agua	17
Figura 4	Recipientes Utilizados para colocar la muestra para la evaluación de Adsc/desorción en Cereal de Maíz en Hojuela	21
Figura 5	Isoterma de Adsorción de Humedad en Cereal de Maíz en Hojuela	26
Figura 6	Isoterma de Desorción de Humedad en Cereal de Maíz en Hojuela	28
Figura 7	Curvas adsc/desorción de Agua a 25°C	30
Figura 8	Isoterma de adsc/desorción Cereal de Maíz en Hojuela a 35°C	30
Figura 9	Calores de Adsorción en Cereal de Maíz en Hojuela	36
Figura 10	Entalpía de Sorción de Cereal de Maíz en Hojuela	38
Figura 11	Energía Libre de Gibbs	41
Figura 12	Entropía de Sorción	42

## INTRODUCCION

Las isothermas de adsorción dan la posibilidad de prever el comportamiento de un alimento después de su tratamiento o almacenamiento en unas condiciones distintas a las que se estudió experimentalmente (Cheftel y Cheftel, 1980). (Dual, 1993)

Las isothermas se obtienen colocando muestras de un mismo alimento (seco o húmedo) cuyo contenido de agua se conoce, bajo ciertas condiciones, en una serie de recipientes cerrados con los cuales se mantienen soluciones salinas (por lo general saturadas) en una gama de humedades relativas constantes en equilibrio con la  $a_w$  del alimento registrándose el peso ganado por el alimento. Tal como fueron evaluados en su momento por diversos investigadores (Hofer y Mohler, 1962; Gal, 1967; Rockland, 1986). Entonces según se parta de un alimento húmedo o de un alimento seco, se obtiene una curva de desorción o adsorción. (Dieter, 1985)

Este trabajo se llevó a cabo experimentalmente con la evaluación de Isothermas de Sorción de Humedad en un Cereal de Maíz en Hojuela por medio del Método Gravimétrico Diferencial.

El trabajo estuvo considerado para la obtención de los isothermas tanto en adsorción como para desorción a 25 y 35°C. Este rango de temperaturas es sustraído de los trabajos experimentales efectuados por otros investigadores como Iglesias y Chirife 1978, De Gois y Col 1985; Marouli y col . 1988.

Para posteriormente evaluar mediante las isothermas de sorción, las propiedades termodinámicas relacionadas con la sorción de agua, y poder establecer los valores de monocapa de B.E.T. y G.A.B. y Entalpías de Compensación en un Cereal de Maíz en Hojuela (Fennema, 1980)

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar mediante Isotermas de Sorción, las propiedades termodinámicas relacionadas con la sorción de agua, para obtener los valores de monocapa de G.A.B. y B.E.T. y Entalpías de Compensación en un Cereal de Maíz en Hojuela.

### **OBJETIVO PARTICULAR I**

Obtener las Isotermas de Adsorción de Agua mediante un método gravimétrico diferencial para el cereal de maíz en hojuela, con la finalidad de obtener sus propiedades termodinámicas

### **OBJETIVO PARTICULAR II**

Obtener las Isotermas de Desorción de Agua mediante un método gravimétrico diferencial para evaluar Entalpías de Compensación.

## 1. ANTECEDENTES

Los cambios que se llevan a cabo principalmente en un alimento son debidos a la forma en como se encuentra el agua en este y a la temperatura a que se encuentra expuesto. El crecimiento y desarrollo de microorganismos, insectos y ácaros, así como la proporción en que tienen lugar cambios físicos y químicos del producto alimenticio, dependen, en alto grado, de dichos dos factores. La relación existente entre el contenido de humedad de un alimento y su actividad acuosa (o humedad relativa de equilibrio), y los efectos que la temperatura tiene sobre esta relación, se ven reflejados en situaciones tan diferentes como el diseño de envases o envolturas del alimento y la ventilación de las bodegas, y los fenómenos a ellos asociados son muchos y variados. (Kent, 1971)

### 1.1. AGUA UNIDA Y ACTIVIDAD DEL AGUA.

El agua unida no es una entidad homogénea, de difícil identificación; Si tratamos de definirla como agua "libre" o "combinada", deberíamos considerar que en los tejidos celulares de los alimentos toda el agua está unida, ya que no fluye libremente del tejido al aplicar una fuerza moderada. Toda el agua dentro del alimento está influenciada de las estructuras biológicas o solutos y por lo tanto, se comportará de manera diferente que el agua pura. (Potter Norman N., 1973, Fennema, 1980).

#### 1.1.1. Actividad de Agua.

Los sistemas termodinámicos de alimentos deshidratados pueden obtenerse al llegar al equilibrio agua-alimento en ambientes de Humedad Relativa constante y Temperatura constante. Donde el solvente en el sistema será agua y los constituyentes del alimento son los solutos que ayudan a formar la solución. En equilibrio, el potencial químico del agua en el alimento es igual al potencial químico de vapor de agua. Si  $\mu$  representa el potencial químico, nosotros podemos escribir que a temperatura constante  $\mu_{\text{vapor}} = \mu_{\text{alimento}}$ .

Para los términos termodinámicos de sistemas no lineales, usamos  $\mu^\circ$  como el estado standard del líquido puro y agua en estado gaseoso.

$$\mu^\circ \text{ vapor} + RT \ln f_w = \mu^\circ \text{ alimento} + RT \ln a_w \quad (1.1)$$

Donde

$f_w$  = fugacidad del vapor sobre el alimento.

$a_w$  = actividad de agua del alimento.

$R$  = Constante universal de los gases.

$T$  = temperatura.

Pero para un líquido puro tenemos:

$$\mu^\circ \text{ alimento} = \mu^\circ \text{ vapor} + RT \ln f^\circ \quad (1.2)$$

Donde:

$f^\circ$  = fugacidad del agua pura a la presión de vapor, de la misma.

De esta manera, por substitución tenemos:

$$a_w = (f_w / f^\circ) T \quad (1.3)$$

La actividad del agua en el alimento es la proporción de la fugacidad del agua sujeta al alimento tanto como al agua pura, ambas medidas a la misma temperatura. Pero recordando que la fugacidad involucra a la presión, se corrige para las desviaciones del comportamiento ideal del coeficiente de fugacidad el cual muestra desviaciones muy pequeñas a la idealidad, con estos valores se tiene unos acercamientos a diferentes presiones para algunas temperaturas.

Por lo tanto:

$$a_w = \left( \frac{p_w}{p^\circ} \right) \quad (1.4)$$

La depresión de la actividad del agua de los alimentos se puede atribuir a la combinación de factores como: interacción agua-alimento, fuerzas capilares y asociación de agua en sitios específicos del alimento. (Cheftel y Cheftel, 1976)

Desde hace mucho tiempo se observó que el agua que se encuentra presente en los tejidos vegetales y animales puede encontrarse más o menos "disponible" y puede conocerse por el nombre de "agua libre" y "agua ligada" y también se observó que el agua ligada se encontraba de una manera fuertemente unida al tejido celular, de tal forma que el agua encontrada en los alimentos determina por tanto la estabilidad de los mismos.

El sistema más fácil para tener una medida de la mayor o menor "disponibilidad" del agua en los diversos alimentos es la actividad de agua ( $a_w$ ), definida por un descenso de la presión parcial del vapor de agua:

$$a_w = P_w/P^{\circ} w \quad (1.5)$$

(a una temperatura  $T_t$  y en el equilibrio)

Donde:

$P_w$  = Presión parcial de vapor de agua de una solución o de un alimento,

$P^{\circ}w$  = Presión parcial del vapor de agua pura a la misma temperatura.

Por lo tanto la actividad de agua es una relación entre dos magnitudes de las mismas dimensiones y por consiguiente constituye una medida relativa por relación a un estado "standard", tomado como término de comparación; el estado standard escogido es el agua pura cuya actividad se fija, como norma, igual a la unidad, con lo que la actividad del agua de una solución o de un alimento siempre es inferior a 1. Se puede explicar este descenso de actividad físico-química, diciendo que los constituyentes químicos presentes, movilizan parcialmente el agua y disminuyen así su capacidad a vaporizarse y probablemente su reactividad química.

En el equilibrio, hay una igualdad entre la actividad del agua de una solución o de un alimento y la presión parcial relativa de vapor de agua ejercida por la solución o el alimento en una atmósfera cerrada que rodee la solución o el alimento.

La "humedad relativa" y la actividad del agua son dos magnitudes directamente proporcionales relacionadas por la ecuación

$$a_w = \text{humedad relativa por } 100 / 100 \quad (1.6)$$

En el equilibrio también hay equivalencia entre la humedad relativa, por ejemplo del aire, y la actividad del agua de los alimentos colocados en ese aire.

Se sabe que según la Ley de Raoult:

$$P = X P^\circ \quad (1.7)$$

donde  $P$  y  $P^\circ$  son las presiones de vapor ejercidas por el disolvente en la solución puro respectivamente y  $X$  la fracción molar del disolvente líquido en la solución de las fórmulas 1.4 y 1.6 se deduce:

$$a_w = X_w \quad (1.8)$$

La Ley de Raoult y la relación 1.7 sólo se aplican estrictamente a soluciones ideales, en el equilibrio: para tales soluciones se pueden calcular las concentraciones correspondientes a diversas actividades del disolvente, en nuestro caso agua.

Con relación a esto, conviene resaltar que, en teoría, la actividad del agua de las soluciones no depende de la temperatura y sí únicamente de la composición de la solución, pero en la práctica la actividad de las soluciones siempre es dependiente de la temperatura (Cheftel y Cheftel, 1976)

El potencial de agua que toma parte en los procesos de deterioro en los alimentos se caracteriza por la Actividad del Agua en el alimento, el cual de acuerdo a la Ley de Raoult es la relación entre la presión de vapor del agua del alimento a una temperatura dada y la presión de saturación del agua pura a la misma temperatura. En general la relación entre la Actividad de Agua y el tipo de deterioro aún no se ha establecido de una manera específica pero los rangos de Actividad de Agua pueden estar definidos donde ciertos tipos de reacciones deteriorativas son dominantes.

La Actividad de Agua de los materiales depende de la composición química de los alimentos, el estado de agregación de sus constituyentes, el contenido de humedad y de la temperatura del alimento.

### 1.1.2. Tipos de Agua.

Tipo IV. Agua con toda su actividad, no existe tan solo en el estado puro. Los tipos restantes (tipo III, II, y I) se encuentran en los materiales biológicos.

Tipo III Es la primera agua eliminada en los productos alimenticios presenta actividad ligeramente inferior a la del agua pura. Este tipo de agua representa la mayor parte del agua de los tejidos vegetales y animales de los alimentos, se separa con facilidad y está más disponible para el crecimiento de los microorganismos y reaccionen químicas. Una vez eliminada, el agua restante va gradualmente perdiendo actividad. Cuando se ha eliminado toda el agua del Tipo III, el contenido de humedad es de alrededor de 12 a 25% y la actividad del agua es de aproximadamente 0.8 (dependiendo del alimento en estudio y de la temperatura manejada. En el Cuadro 1 se muestra un resumen de la manera como el agua se encuentra en los alimentos, donde se incluyen los tres tipos principales.

Tipo II Esta agua es muy difícil de eliminar y su eliminación lleva a una mayor reducción de la actividad del agua. La eliminación parcial del agua del Tipo II corresponde aproximadamente a la estabilidad óptima de los productos secos que contienen cantidades importantes de lípidos oxidables.

Tipo I. Se puede llegar a conseguir la eliminación parcial de dicha agua por medio de deshidratación, pero no por congelación. El agua del Tipo I está muy unida que resulta imposible medir cualquier reacción que dependa de la solvatación. En esta región se observa una aceleración de las reacciones de la fase líquida, tal como la rancidez oxidativa (Fennema 1980)



Cuadro 1 Tipos de agua en los alimentos

Tipos de Agua	Intervalos	Condición del agua
III	0.8 - 0.99	Agua móvil encerrada en tejidos por membranas o contenida en macrocapilares (diámetro mayor a $1\mu\text{m}$ )
II	0.25 - 0.8	Moléculas del agua con movilidad restringida por ejemplo en microcapilares (diámetro menor a $1\mu\text{m}$ ), punto de congelación sensiblemente disminuido.
I	Menor a 0.25	Agua "No congelable"

Fuente Dieter Belitz H. 1985

## 1.2. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ACTIVIDAD DE AGUA.

### a) Basadas en las Propiedades Coligativas.

Asumiendo que la fugacidad del vapor de agua es aproximadamente igual a la presión la medición directa de la presión puede usarse para medir la Actividad del Agua en los alimentos de una manera directa.

Basadas en la depresión del punto de Congelación

Este método se aplica sólo a alimentos líquidos y provee la Actividad de Agua a temperaturas cercanas a la congelación. Ofrece la ventaja de tener una buena precisión de Actividades de Agua a rangos altos mayores 0.98 y pueden aplicarse a sistemas que contengan grandes cantidades de sustancias volátiles

### b) Basadas en las Psicometría.

Las mediciones del punto de rocío y de la depresión del bulbo húmedo por medios psicrométricos se llevan a cabo con aire e higrómetros eléctricos para poder determinar la Actividad de Agua. Este método no es muy recomendable utilizarlo en muestras pequeñas sino solo en almacenes refrigerados y de secadores comerciales. Muchas de las limitaciones psicrométricas son condensación de materiales volátiles transferencia de calor por conducción y radiación y se necesita como mínimo velocidades mayores de 3 m/h

c) Basadas en la Transferencia Isopiética.

El método isopiético se llevan al equilibrio dos materiales en un sistema cerrado para poder determinar las Actividades de Agua. La transferencia de humedad se lleva a cabo en ambos materiales por una depresión al contacto directo de los materiales, así permitiendo el movimiento a través del espesor de una membrana microcapilar (Rizvi, 1984), (Escamilla, 1996).

### **1.3. ISOTERMAS DE SORCIÓN DE HUMEDAD.**

La Isoterma de sorción es una curva de equilibrio a temperatura constante en la que se indica la cantidad de agua retenida por un alimento en función de la humedad relativa de la atmósfera que le rodea.

Las Isotermas de Sorción de Humedad es importante considerarlas para los procesos de secado, empaquetado y los procesos de almacenamiento de los alimentos. Muchos de los productos alimenticios son de naturaleza compleja y las predicciones teóricas de los isotermas no bastan, por lo tanto es necesario hacer mediciones experimentales de estos. Los datos de sorción también sirven para predecir la calidad de los alimentos almacenados.

Con el conocimiento del Isoterma de Sorción de Vapor de Agua, es posible determinar el cálculo de entalpías de sorción y desorción y poder determinar "Enlace del Agua" la cual sostiene toda la estructura de los alimentos y facilita el cálculo y operación del proceso de secado mezclado y procesos de empaquetamiento y poder evaluar la estabilidad microbiológica ó física y química del alimento y finalmente predecir su vida útil.

Las Isotermas se obtienen colocando un alimento de contenido de agua conocida en un recipiente cerrado bajo vacío, y midiendo después de haber establecido el equilibrio a una temperatura determinada, la presión de vapor de agua, utilizando un manómetro o un higrómetro, también se puede obtener colocando las muestras de un mismo alimento (seco/adsorción, húmedo/desorción) en una serie de recipientes cerrados en los cuales se ha depositado previamente una serie de diferentes soluciones salinas saturadas de humedades relativas constantes conocidas ó ácido sulfúrico de diversas concentraciones y determinando en equilibrio los contenidos de agua. (Hubinger y col. 1992), (Martín y Romero, 1993), (Mazza, 1986).

La Isoterma de Sorción se describe de una manera completa con el gráfico de la Cantidad de Agua adsorbida como una función de la Humedad Relativa o de la Actividad del Vapor del Espacio circundante del material. Esta cantidad de agua obtenida antes de haber alcanzado el equilibrio a una temperatura constante. La Actividad de Agua ó Humedad está definida por :

$$a_w = P / P_o = \% \text{ Humedad Relativa} / 100 \quad (1.9)$$

Donde :

P = Presión de vapor del agua ejercida por el alimento.

P<sub>o</sub> = Presión de vapor del agua pura a la temperatura T.

T<sub>o</sub> = Temperatura de equilibrio del sistema.

La curva de la Isoterma puede obtenerse en una o dos direcciones. La Isoterma de Absorción se hace colocando un material completamente seco dentro de varias atmósferas que incrementen su Humedad Relativa y entonces se mide la ganancia de peso debida al agua. Y para la Isoterma de Desorción se coloca a las mismas Humedades Relativas la muestra de estudio pero completamente húmeda y se registra la pérdida de peso de las muestras (Chirife y col., 1986)

### **1.3.1. Tipos de Isotermas de Sorción de Humedad según los componentes constituyentes del alimento**

En base del comportamiento de sorción de humedad, cabe dividir los componentes de alimentos en tres clases, cada una de las cuales da una curva de isoterma característica de sorción de humedad.

- Proteínas y polímeros de carbohidratos.
- Sales y azúcares cristalinos.
- Azúcares vítreos.
  
- Proteínas o polímeros de carbohidratos

Las curvas de isoterma de sorción de humedad de las proteínas o los polímeros de carbohidratos, tales como el almidón y la celulosa, son curvas levemente en forma de S (curvas sigmoideas) que no presentan ninguna solución de continuidad. Un rasgo característico de estas curvas es que presentan el fenómeno llamado histéresis, el cual se refiere a que el contenido de humedad que corresponde a una humedad relativa de equilibrio puede tener dos valores, uno de ellos correspondiente al material que absorbe agua, y otro correspondiente al material que se está desecando o que desabsorbe humedad. La influencia de la histéresis puede establecer una diferencia de 1.5% hasta 2.0% del contenido de humedad representando por un valor determinado de la humedad relativa de equilibrio; por lo tanto, es muy importante que, cuando se mencionen datos de sorción de humedad, se indique si el material está absorbiendo o desabsorbiendo agua. Puesto que, inicialmente, la mayoría de los productos almacenados están relativamente secos y, durante un almacenamiento prolongado, tienden a absorber agua de la atmósfera, el contenido de humedad y la humedad relativa de equilibrio se indican haciendo referencia a la curva isoterma de absorción; cuando los datos gráficos vienen presentados en forma de una sola curva, puede darse por supuesto que la curva representada es la curva isoterma de absorción. (Jamieson M. y Jobber P., 1975).

Las curvas de este tipo pueden dividirse en tres partes :

En el intervalo de baja humedad ( 0 a 25%) la curva es cóncava respecto al eje de humedad, y se considera que a medida que aumenta la humedad relativa, se van acumulando moléculas de agua para que creen el estado de capa monomolecular cuando la humedad relativa queda situada en algún punto dentro del intervalo del 15 al 25%.

Dentro del intervalo de humedad intermedia (25 a 75%), hay una región casi rectilínea de la curva en la que se piensa que, a medida que aumenta el contenido de humedad, pueden formarse, encima de la capa monomolecular, otras capas de moléculas de agua más flojamente ligadas.

La parte final de la curva de la isoterma (por encima del 75% de humedad relativa), en la que el contenido de humedad sube más verticalmente, probablemente

representa una región en la que está presente agua suficiente para que disperse los constituyentes coloidales y para que finalmente llene los espacios capilares entre partículas cuando se llega a alcanzar niveles muy altos de humedad relativa de equilibrio .

- Sales o azúcares cristalinos

Se tienen aumentos del contenido de humedad cuando se hace que un material inicialmente seco esté en equilibrio con aire cuya humedad relativa va en aumento. Sin embargo, la elaboración de alimentos implica, a menudo, su desecación, para la que se utiliza aire con poca humedad a bajos niveles mediante un proceso inverso al que hemos descrito. En condiciones de desecación, el contenido de humedad va disminuyendo de modo continuo y constante y, en el caso de algunos componentes de alimentos, la humedad relativa de equilibrio va disminuyendo siguiendo la línea de la curva isoterma de sorción. Sin embargo, cuando esta operación de desecación se lleva a cabo con alimentos que contienen grandes cantidades de azúcares, la curva isoterma de desorción puede no ser idéntica a la curva isoterma de adsorción, como resultado de cierto tipo de histéresis. Este fenómeno es resultado de la tendencia de los azúcares a formar soluciones sobresaturadas viscosas (azúcar vitrificado) que pueden ser rápidamente estables si la concentración o desecación se lleva rápidamente a un bajo contenido de humedad. (Jamieson M. y Jobber P., 1975)

- Azúcar Vítreo

El azúcar vítreo es un líquido al que se subenfria y cuya viscosidad es tal que es capaz de sostener su propio peso sin deformación. Cuando se concentra un jarabe azucarado con alto contenido de humedad, la humedad relativa de equilibrio y su contenido de humedad disminuyen siguiendo la curva indicada en la siguiente figura. Si este proceso se lleva a cabo rápidamente, el contenido de humedad puede disminuir a un bajo nivel antes de que puedan producirse la solución sobresaturada. Estos azúcares vítreos con bajo contenido de humedad pueden permanecer estables durante períodos indefinidos siempre que no se les permita adsorber agua. Si los azúcares vítreos se exponen a una atmósfera con alta humedad relativa, comienzan

a adsorber vapor acuoso y la viscosidad de la solución así formada disminuye hasta un nivel que permitirá que a una humedad relativa dentro del intervalo del 30 al 60% se produzca cristalización (Jamieson M. y Jobber P. 1975)

El agua ligada a los azúcares vítreos es agua de solución y es un dato notable que, dentro de una misma escala, puedan producirse soluciones de azúcar sobresaturadas con contenido de humedad extremadamente bajo, ya sea en forma de agua de composición o de agua adsorbida (Jamieson y Jobber., 1975).

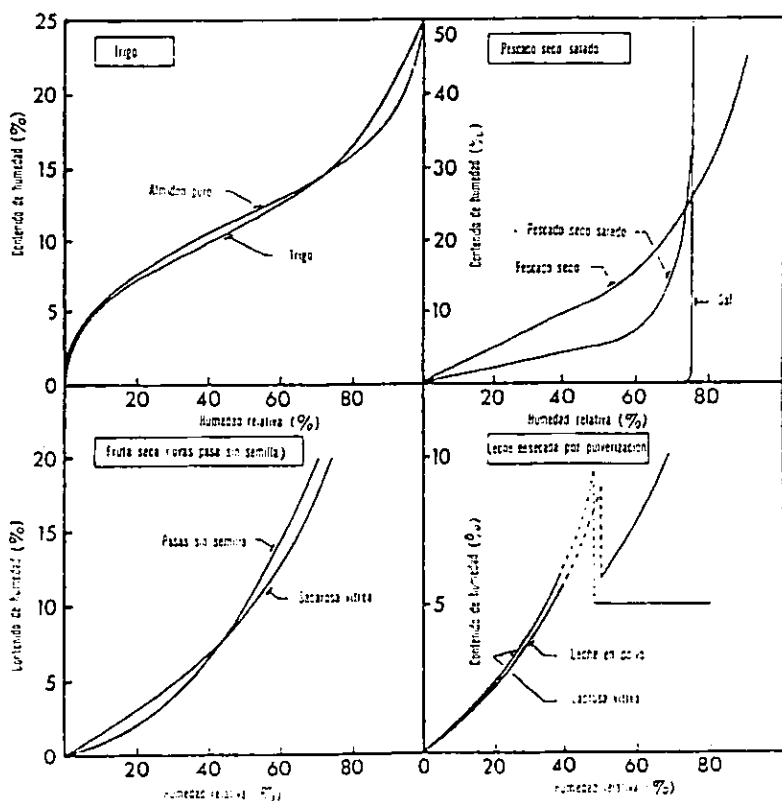


Fig. 1. Curvas isotermias de diversos alimentos y sus materias constituyentes

### 1.3.2. Isotermas de Adsorción y Estado del Agua en los Alimentos.

Podemos delimitar por lo menos en dos zonas diferentes a las isotermas de sorción de los alimentos. En la zona I, en la cual la actividad del agua está comprendida entre 0, 0.2 ó 0.3 corresponde al agua fuertemente ligada; en esa región de la isoterma existe una capa monomolecular de agua fija a los grupos polares de ciertos compuestos, especialmente los grupos  $R-NH_3^+$  y  $R-COO^-$  de las proteínas y los grupos  $R-OH$  de los almidones y probablemente, también el agua de cristalización de las sales y azúcares., el agua de esta capa no está disponible para actuar como disolvente o reactivo.

Por lo general, encima de la zona I, las isotermas de adsorción están divididos arbitrariamente, en 2 ó 3 secciones suplementarias (zona II y III respectivamente), que corresponden al agua cada vez más libre. Se trataría, por consiguiente, de sucesivas capas de agua, fijas sobre la primera capa por medio de enlaces hidrógeno: a esta agua, que representa la mayor parte de la esfera de hidratación de los constituyentes solubles (proteínas, sales, etc.) y cuyo descenso de presión parcial de vapor obedece a la Ley de Raoult, se puede añadir el vapor de agua condensado en los poros de los alimentos, que actúan como tubos capilares. La condensación de agua en esos poros disminuye tanto más que la presión parcial de vapor de agua cuanto menor sea el diámetro del poro. En todas estas partes de las isotermas, a pesar de actividades del agua tan bajas como 0.2 y 0.3, el agua presenta sus propiedades habituales como es la disponibilidad tanto como disolvente y como reactivo. (Cheftel y Cheftel, 1976), (Potter, 1973) .

El agua "libre" representa la mayor parte del agua de los alimentos frescos o elaborados, (pero no deshidratados); así lo demuestra la última parte de la isoterma de adsorción, la actividad del agua, se aproxima al máximo, siempre que el contenido del agua del alimento no sea inferior al 50%.

Esta agua por muy "libre" que sea, no sale espontáneamente de los tejidos animales y vegetales, salvo que estén dañados físicamente o modificados con agentes químicos o bioquímicos. Esta agua presenta las características de enlazarse por puentes de hidrógeno, pero no es posible decir si estas características influyen su

retención en los tejidos. Esta agua se encuentra en una gran parte bajo la forma de geles, tanto en el interior de las células como en los espacios intercelulares; su retención está fuertemente influenciada por el pH y las fuerzas iónicas, en la Figura 1 se muestra la isoterma general de absorción de alimentos. (Jamieson y Jobber, 1975)

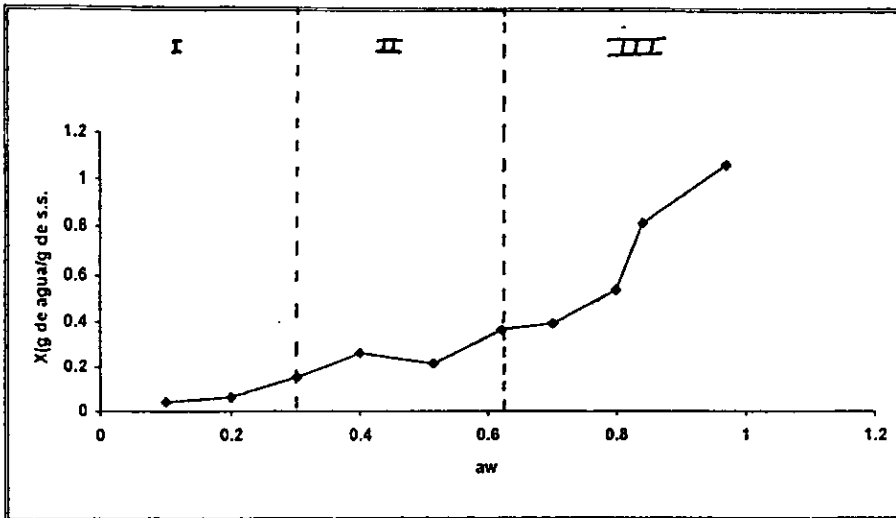


Figura 2. Curva Isoterma General de Adsorción de Agua en Alimentos (20°C). (Jamieson y Jobber, 1975)

### 1.3.3. Importancia de las isotermas de sorción en el procesamiento y conservación de alimentos.

Las isotermas permiten prever la actividad del agua de mezclas de diversos ingredientes, más o menos húmedos, dan la posibilidad de prever el comportamiento de un alimento después de su tratamiento o almacenamiento en unas condiciones distintas a las que se estudió experimentalmente.

Las curvas de adsorción permiten prever la influencia de las variaciones de humedad relativa ambiente, sobre el contenido en agua de un producto no protegido; indican así la higroscopicidad del producto, (Villota y col., 1980).



Si el producto está empacado en un embalaje que posee cierta permeabilidad al vapor de agua, se puede calcular también la cantidad de agua adsorbida en función del tiempo de almacenamiento y en definitiva la duración de conservación de un alimento con un nivel de calidad aceptable.

Se puede resaltar que la velocidad de alteración no es siempre proporcional a la actividad del agua. En la práctica, se considera a menudo que la estabilidad máxima se alcanza en el ámbito de la capa monomolecular de agua. El conocimiento de las isothermas de sorción de un alimento, en unión con otros datos de importancia permiten prever el grado de deshidratación más favorable para la estabilidad de un alimento. (Cheftel y Cheftel, 1976 ).

En la fig. 3 se muestra que para humedad alrededor del 80-99% existe crecimiento de microorganismos, actividad enzimática, reacciones hidrolíticas, oxidativas y pardeamiento no enzimático con estabilidad decreciente, a humedad de alrededor del 25-80% también se presenta pardeamiento no enzimático, actividad enzimática, reacciones hidrolíticas y reacciones oxidativas con estabilidad decreciente y para el caso de humedades de 0-25% predomina la autooxidación de lípidos pero con estabilidad óptima de productos secos que contienen cantidades importantes de lípidos oxidables por más tiempo que para humedades mayores. Por lo tanto la velocidad de reacción deterioro en un alimento se ve favorecido o reducido según sea su actividad de agua dándose una descomposición más rápida a alimentos con alta humedad por arriba del 70%.

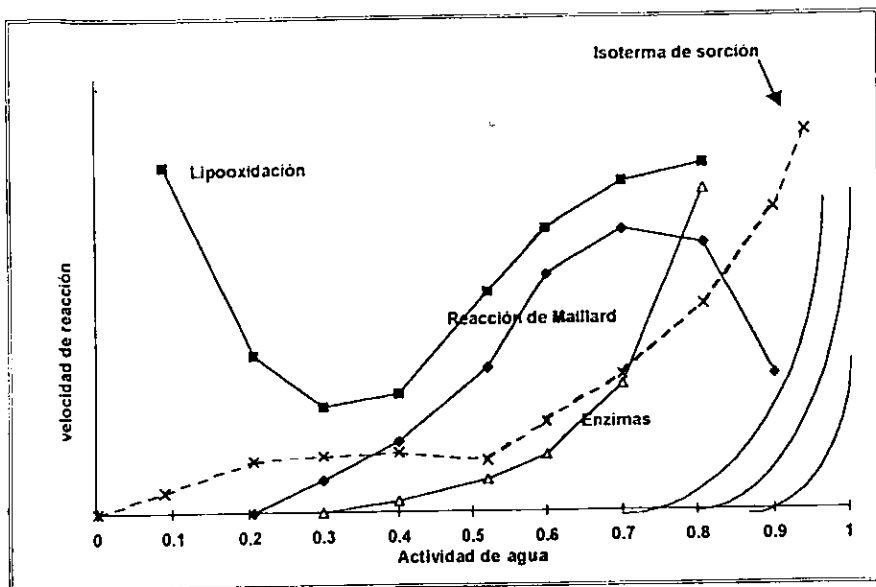


Figura 3. Estabilidad de los alimentos basándose en su actividad de agua (Labuza, 1971)

#### 1.4. METODOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS DE SORCIÓN

##### 1.4.1. Métodos Gravimétricos.

El principio de este método se basa en la determinación de los cambios de peso de muestras hasta llegar al equilibrio con diferentes presiones de vapor de agua

A) Método Continuo: Si se coloca una balanza fija a una parte del equipo entonces pueden llevarse a cabo los registros de los cambios de peso de una manera continua, sin interrupción del proceso de sorción. A este método se le puede adicionar un sistema de vacío con el cual se puede acelerar la difusión de las moléculas de agua en fase vapor.

\*Sistema Dinámico. A nivel laboratorio se utilizan otros dispositivos tales como el hacer circular aire como transporte del vapor de agua sobre la muestra y así evitar el uso de vacío. El problema de este método radica en mantener los valores exactos de humedad del gas circundante. Se utilizan principalmente para simular el proceso de secado convencional y para detectar cambios en la estructura de la fase del sorbente.

B) Método Discontinuo: Si no se cuenta con una balanza fija al equipo, entonces las muestras son sometidas a diferentes humedades relativas de equilibrio y los contenidos de humedades pueden determinarse por operaciones separadas. El propósito de este método radica en que es muy fácil detectar cambios físicos tales como: endurecimiento, encogimiento, decoloración etc..

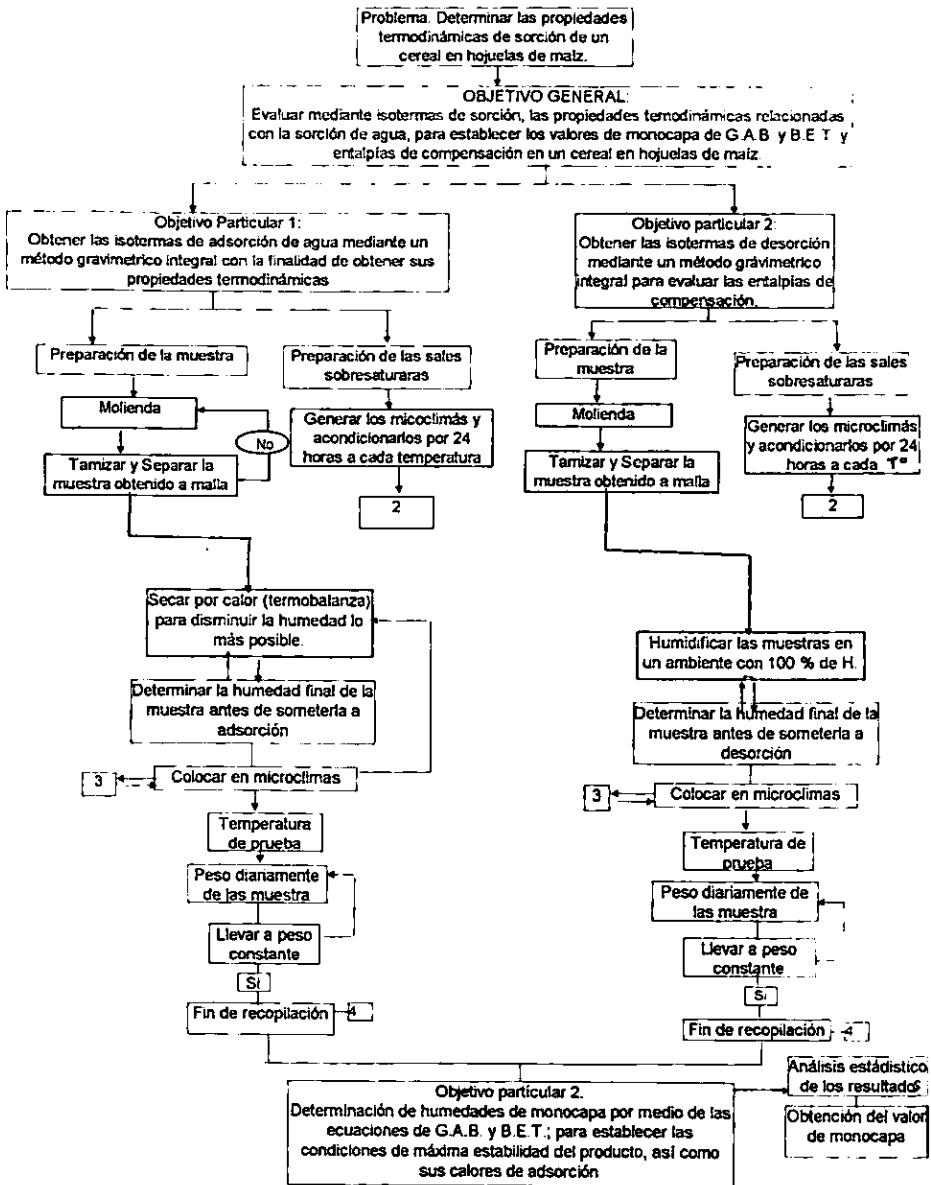
\*Sistema Estático: Es una Técnica simple, en la cual las muestras se llevan al equilibrio en un desecador en contacto con soluciones saturadas de sales o con ácido sulfúrico. Los tiempos totales para llegar al equilibrio varían desde 1 a 10 semanas dependiendo de varios factores. Deben tenerse ciertas precauciones en algunos alimentos, y poder prevenir la interacción entre los gases de descomposición del alimento y las soluciones de electrolitos, o viceversa.

\*Sistema Dinámico: Es utilizado para analizar una gran cantidad de alimentos y componentes alimenticios, Se obtienen las isotermas al someter a la muestra a cierta temperatura regulada por un termostato, y aire humidificado conteniendo una solución de cloruro de sodio el cual se circula en un sistema cerrado. Existen algunas modificaciones del sistema como el utilizar doce cambios de aire a diferentes humedades, y se desea obtener el isoterma completo el tiempo aproximado para obtenerlo es de 24 a 36 horas (Duckworth R. B. 1974).

(Rizvi y Benado, 1984).

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1 CUADRO METODOLOGICO.



## 2.2 MATERIALES

### 2.2.1 Harina de cereal de maíz en hojuela.

Se utilizó Cereal de Maíz en hojuela Maizoro, se sometió a molienda hasta obtener un tamaño de partícula retenido en malla 20, con la finalidad de que el tamaño de partícula fuera uniforme, para tener mayor superficie de contacto en la transferencia de vapor de agua al cereal.

### 2.2.2 Preparación de las sales

Las sales utilizadas para crear los microclimas deben ser puras fuera de materia extrañas que modifiquen su capacidad de crear cierta  $a_w$ , la concentración utilizada se mostró en el siguiente cuadro:

Cuadro 2. Solubilidad Aproximada de Sales creadoras de los Microclimas

Sales	Solubilidad aproximada en agua caliente g/100ml	Humedad Relativa % a una cierta temperatura
LiBr	240	7
LiCl·H <sub>2</sub> O	100	11
K(CH <sub>2</sub> COO)	500	22
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	300	32
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	150	43
NaBr·2H <sub>2</sub> O	120	58
NaNO <sub>2</sub>	150	65
NaCl	40	75
KCl	50	85
BaCl <sub>2</sub>	50	90
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	20	97

(Rockland, 1980).

Se utilizó agua destilada para evitar cualquier interferencia de otras sales extrañas contenidas en el agua corriente. Se agregó en pocas cantidades hasta que sin dejar de agitar la sal ya no se solubilizaba en el agua; el agua debe estar caliente pues esto favorece la solubilización de las sales. (Kitic, y col., 1986).

### 2.2.3 Determinación de humedad del cereal de maíz en hojuela.

Esta fué determinada por el método de secado por termobalanza digital AD-4714 A colocando 10g muestra a 70 °C/ 20 min. Las determinaciones se hicieron por triplicado utilizando el método oficial de la AOAC.

## 2.3 ISOTERMA DE SORCIÓN DE HUMEDAD.

### 2.3.1 Isoterma de adsorción de humedad.

Se determinaron isotermas de adsorción a 25 y 35°C, la muestra total (fué aproximadamente 30-35g) se secó en termobalanza hasta que la humedad de la muestra fué menor al 2%. Las muestras (1g aproximadamente) se sometieron a diferentes actividades de agua, dadas por sales de actividad de agua conocida, para poder obtener la isoterma.

Un gramo de muestra se colocó en un contenedor de plástico semejante al que se muestra en la figura 3 y fué puesto dentro de un recipiente de plástico con cierre hermético que contendrá una solución sobresaturada de sal (cuadro 3), iniciando con actividad de agua de 0.113 hasta actividad de agua de 0.973.

Se registraron los pesos de los contenedores con muestra cada tercer día en un periodo aproximado de dos y media semanas.

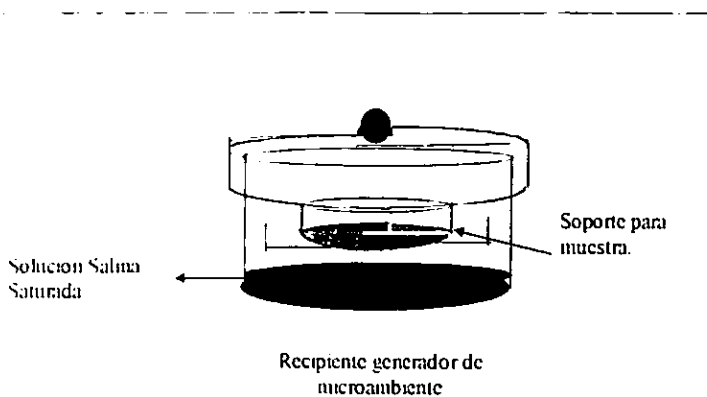


Figura 4. Recipientes utilizados para colocar la muestra para la Evaluación de Adsorción/Desorción en Cereal de Maíz en Hojuela (Karel M., 1975).

Cuadro 3 Actividad de Agua de las sales utilizadas y su actividad de agua teórica a 25°C.

SALES	aw teórica a 25 °C
Cloruro de Litio	0.113
Acetato Potasio	0.225
Cloruro de Magnesio	0.328
Nitrato de Magnesio	0.529
Bromuro de Sodio	0.576
Cloruro de Sodio	0.75
Sulfato de Amonio	0.810
Nitrato de Potasio	0.936
Sulfato de Potasio	0.973

-Rzvi, 1964.

### 2.3.2 Isotermas de Desorción de Humedad.

Se sometió la muestra a hidratarse por un período de cuatro días como máximo en un desecador de laboratorio con agua (para evitar la condensación excesiva y posible contaminación o proliferación de microorganismos). Una vez hidratada y alcanzando una humedad aproximada del 25% se colocó un gramo de muestra para cada actividad de agua de estudio utilizando el mismo criterio que en las isotermas de adsorción en el cual se depósito el gramo de muestra a las diferentes actividades de agua de estudio y sometiéndolo a temperaturas de 6, 25 y 35°C por un periodo de dos y media semanas (Saguy y Drew, 1987), (Lang y Sternberg, 1981).

### 2.4 Método matemático para obtención de isotermas de sorción de humedad

- I. Obtener los valores de g agua/g s.s. en base seca
- II Utilización del Método B E T. para estimar el valor de monocapa ( $X_0$ ) Únicamente válido para actividades de agua de 0 a 0.5. (Fennema, 1980)

$$\frac{X}{X_0} = \frac{C \cdot a_w}{(a \cdot a_w)(1 \cdot a_w + C \cdot a_w)} \quad (2.0)$$

donde

X = Contenido de agua para cada actividad de agua y evaluado a diferentes temperaturas

$a_w$  = Actividad de Agua.

$X_0$  = Contenido de agua correspondiente a la capa monomolecular

C = Constante

Después de calcular el valor de monocapa, se efectuó una interpolación dentro de los valores de 0 a 0.5  $a_w$  para conocer la  $a_w$  correspondiente a los valores de monocapa para cada temperatura.

III. se utiliza la ecuación de Clausius Clapeyron con la cual Labuza (1968), Loncin (1980) e Iglesias y Chirife (1976) demostraron que esta ecuación puede aplicarse para predecir el valor del Calor de Sorción ( $Q_s$ ) de la siguiente manera

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} = \frac{Q_s}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

$a_{w1}$ ,  $a_{w2}$  son las actividades de agua a la temperatura  $T_1$  y  $T_2$  (K)

R = Constante de los gases (J/molK)

Qs = Calor de Sorción (J/mol)

Los Qs se estimaron con un mínimo de tres temperaturas graficamente.

A partir de los datos de Qs se obtuvo la Entalpía de Sorción ( $\Delta H$ ) de:

$$\Delta H = Q_s - \Delta H_{vap} \quad (2.2)$$

Donde:

$\Delta H$  = entalpía de Sorción (J/mol)

Qs = Calor de Sorción

$\Delta H_{vap}$  = Entalpía de Vaporización del agua pura a cada temperatura de estudio (J/mol)

De igual forma después de calcular la entalpía de sorción se determinó la Energía libre de Gibbs para el sistema de adsorción de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\Delta G = RT \ln(aw) \quad (2.3)$$

Donde:

$\Delta G$  = Energía Libre Gibbs (J/mol)

R = Constante de los gases

aw = Actividad del Agua

Así mismo se determinó la entropía de Sorción de la forma mostrada a continuación

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (2.4)$$

Donde:

$\Delta H$  = Entalpía de Sorción

$\Delta G$  = Energía Libre de Gibbs

T = Temperatura

Y por último el Calor de Descompensación o Compensación

$$Q_{st} = RT * M \ln aw \quad (2.5)$$

(Aguerre y col., 1984), (Caurie, 1981), (Chirife y col., 1986), (Iglesias y Chirife, 1984)



## 2.5 EVALUACION DE LOS MODELOS MATEMATICOS

La determinación de los parámetros característicos de los modelos matemáticos se realizó empleando la técnica de regresión no lineal de múltiples variables. Los valores de  $a_w$  sobre los cuales se hizo la regresión fueron a:

1. 9 puntos experimentales para G.A.B., OSWIN, CAURIE, HENDERSON, KIHN SMITH, BRADLEY, IGLESIAS.
2. 4 puntos experimentales (0.115 - 0.529) para B.E.T.
3. Para comprobar la calidad de ajuste de los modelos matemáticos se utilizaron los modelos de B.E.T., G.A.B., OSWIN, CAURIE, HENDERSON KUHN, SMITH BRADLEY, IGLESIAS y se determinó el error relativo medio (RMS), (Lomauro y col; 1985).

$$4. \text{RMS} = \frac{\sum (Y_{\text{obs}} - Y_{\text{cal}})^2}{n} * 100 \quad (2.6)$$

En Cuadro 4. se muestra la escala de calificación que fue considerada para el ajuste de los modelos.

Cuadro 4. Escala de calificación de ajuste de calidad medido por el RMS

Error Relativo Medio (RMS)	Calificación
0 - 0.5%	Excelente
- 10%	Muy bueno
10 1 - 15%	Bueno
- 20%	Regular
20% ó más	Malo

(Lomauro, 1985)

### 3. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

#### 3.1 Análisis Químico Proximal.

En el Cuadro 5 se muestran los resultados obtenidos del análisis químico proximal realizado al cereal antes de su tratamiento para obtener las isotermas de adsorción.

Cuadro 5 Valores del Análisis Químico Proximal del Cereal de maíz en hojuela.

COMPOSICION QUIMICA	%
Proteínas	6.5 - 8
Carbohidratos	84 - 90
Almidones	70 - 73
Sacarosa y otros Carbohidratos	12 - 14
Fibra cruda	2 - 3
Grasa	0.3 - 1
Cenizas	1.5 - 3

De este cuadro se observa que los componentes mayoritarios del cereal de maíz en hojuela son los carbohidratos en especial los almidones, de tal manera que estos influirán en gran medida en la tendencia de la isoterma, ya que la propiedad funcional fundamental de un almidón es la de hidratarse rápidamente. (Rockland, 1986)

#### 3.2 ISOTERMAS DE SORCION A DIFERENTES TEMPERATURAS

Después del proceso es necesario conservar el producto en condiciones lo más adecuadas posibles. en el caso de los cereales para desayuno, uno de los factores importantes a considerar es la crujencia de este, que depende de la humedad presente alrededor del producto por lo que es necesario basarse en las isotermas de sorción

Por otro lado y como se ha establecido la forma como el agua es adsorbida no será lo mismo en desorción puesto que hay un cambio termodinámico que impide la total

reversibilidad del sistema por lo que a su vez se hace también necesario realizar un estudio en este sentido. A continuación se presentará el análisis de las isotermas para ambos casos.

### 3.2.1 Isoterma de adsorción.

En la Figura se muestra la isoterma de adsorción obtenida a 25 y 35 °C para el cereal de maíz en hojuela a un tamaño de partícula promedio correspondiente al retenido en malla 20.

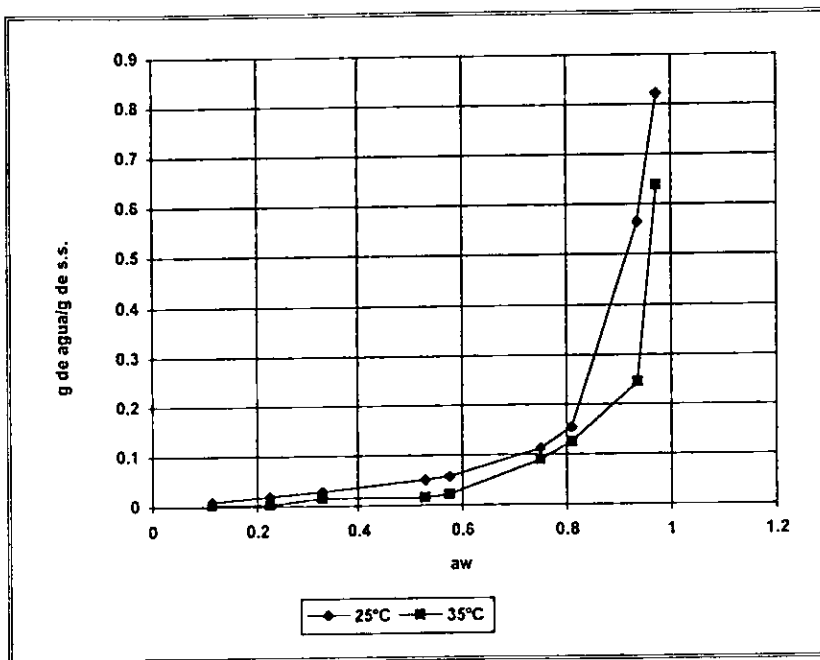


Figura 5. Isotermas de Adsorción de Humedad para Cereal de maíz en hojuela.

Saravacos y Stinchfield (1965) reportaron para un modelo de almidón-glucosa al igual que Audu y col. (1976) en azúcares, Weisser y col. (1982) en alcohol con azúcar y Silverman y Asociados Solverman y col. (1983); Lee y col. (1981) para isotermas de tocino precocido a 20 y 35°C sus trabajos coincidían en que todos estos sistemas alimenticios contenían una gran cantidad de componentes de

moléculas de bajo peso molecular y mezclas de constituyentes de alto peso molecular. A bajos contenidos de  $a_w$  la adsorción de agua es debida principalmente a los biopolímeros y al aumentar la temperatura tiene un efecto normal en que las isotermas decrecientan; para el caso de los azúcares de bajo peso molecular la temperatura favorece su disolución en el agua adsorbida.

De acuerdo con la gráfica anterior se observa que el cereal tiene un incremento moderado en el contenido de agua, conforme aumentó la  $a_w$  hasta aproximadamente un 0.6 de  $a_w$  y posteriormente existió un incremento mayor y acelerado a actividades de agua por encima del 0.7 hasta cerca de 1.0.

Esto se debió a que en valores de actividad de agua bajo, el predominio de adsorción estuvo dominado por las moléculas de alto peso molecular como son polisacáridos los cuales tienen una mayor capacidad de adsorción y retención de agua, debido a sus grupos oxhidrilos que tienen una gran capacidad y a sus sitios de sorción.

En cambio a actividad de agua de media a alta existió un dominio por parte de las constituyentes de bajo peso molecular como sales, minerales y azúcares, los cuales se ven favorecidos a disolverse más fácilmente a altos contenidos de humedad. Esto coincide con los trabajos reportados por Saravacos y Stinchfield (1965) para un modelo de almidón-glucosa. Audu y col (1976) en azúcares, Weisser (1982) en alcohol con azúcar, Silverman y asociados., Solveman y col. (1983), Lee y col. (1981) para isotermas de tocino precocido a 20 y 35°C.

Por otra parte se observó que existe mayor capacidad de adsorción a la temperatura de 25°C debido a que conforme se aumenta la temperatura los polisacáridos (que son de los componentes mayoritarios del cereal) pierden capacidad de retención de agua a 35°C. y a que el alimento sufre alteraciones estructurales. de sus propiedades funcionales sucediendo algo similar en la estructura de otros alimentos de composición diferente como el comportamiento observado por otros investigadores para diferentes frutas Iglesias y Chirife (1976); De Gois y Cal-Vital (1985). Marouiti y col. (1988) Y puede explicarse de la siguiente manera la sorción

es principalmente debida a que las macromoléculas presentes en el cereal están unidas por puentes de hidrógeno al agua, siendo más débiles estos enlaces al aumentar la temperatura favoreciendo una sorción mayor a 25°C.

### 3.2.2 Isotermas de Desorción

La Figura 6 muestra la isoterma de desorción obtenida a diferentes temperaturas, de donde se analizará su comportamiento y posteriormente se comparará con los resultados obtenidos en la isoterma de desorción en relación con sus propiedades termodinámicas.

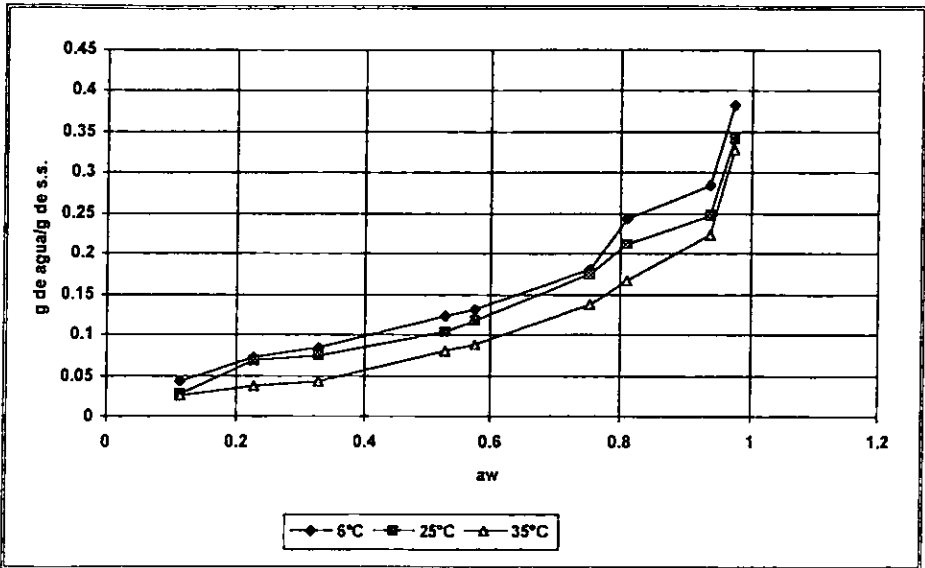


Figura 6. Isotermas de Desorción de Cereal de Maíz en Hojuela.

Para el caso de las isotermas de desorción el fenómeno de desorción se llevó a cabo de una manera más uniforme pero en mayor proporción que para adsorción, esto se debió a que el alimento expuesto a las diferentes actividades de agua se encuentra a su máxima capacidad reteniendo el agua adsorbida en su preparación

y por lo tanto el proceso de desorción se lleva a cabo de una manera más espontánea.

La influencia de la temperatura para este proceso no es muy fuerte o significativa puesto que el desprendimiento del agua de los sitios de sorción es muy fácil, pues el agua acumulada en capas pierde energía rápidamente; sin embargo se observó que el cereal tuvo una mayor facilidad de desprendimiento de agua a 6°C que para 25 y 35°C en los cuales el comportamiento fué muy similar.

### **3.2.3 Comparación adsorción/desorción.**

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 1 el fenómeno de adsorción/desorción produce que el agua en un alimento procesado no sea desadsorbida de la misma manera en que sé adsorbio, ya que el alimento sufre cambios a nivel molecular que impiden que se vuelvan a formar los mismos espacios debido a modificaciones estructurales por la unión de componentes que impiden la movilización rápida del agua. En la Figura 7 se muestra el comportamiento a 25°C durante ambos procesos

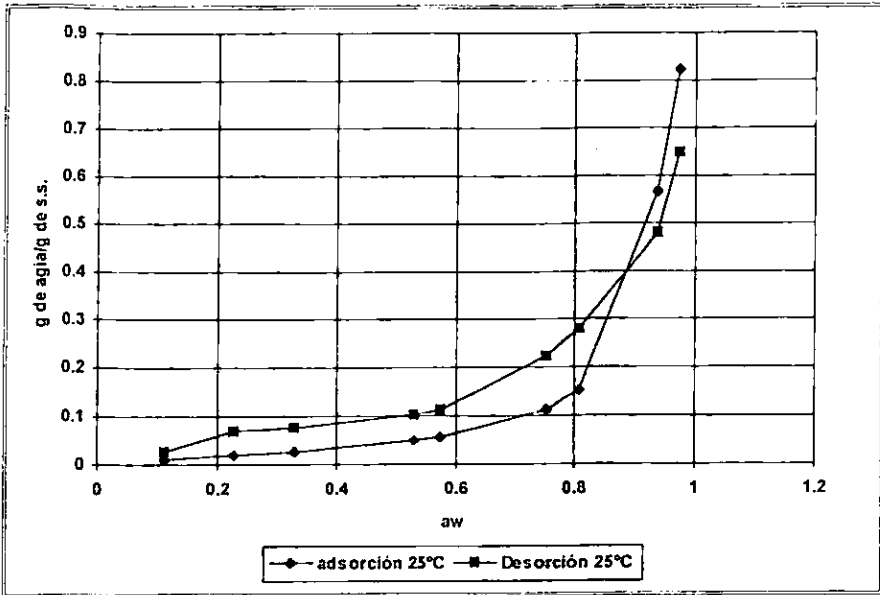


Figura 7. Isotherma de ad/desorción de Agua a 25°C.Cereal de Maíz en Hojuela

A su vez en la Figura 8 se muestra el comportamiento adsorción/desorción a 35°C

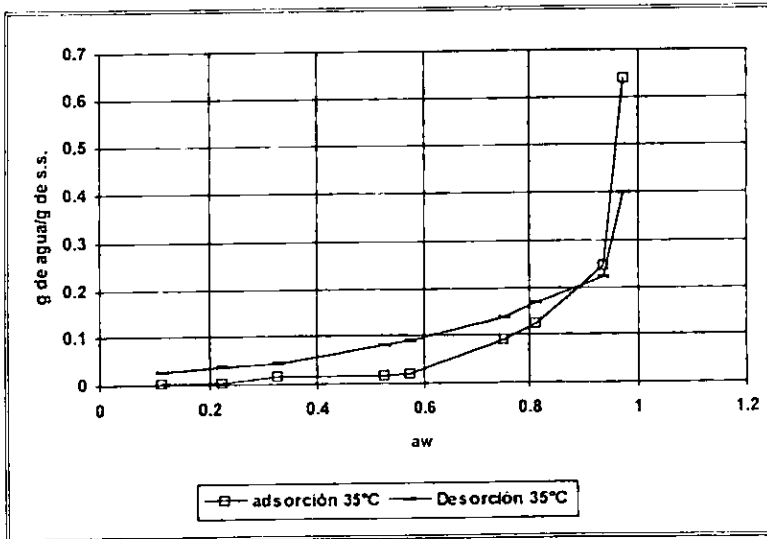


Figura 8. Isotherma de ad/desorción de agua a 35°C en Cereal de maíz en Hojuela.

Se observó que el contenido de humedad aumentó conforme aumento la actividad de agua y esto fué más marcado para el caso de isothermas de desorción que para la adsorción, esto se debió a que en la zona de actividad baja el agua estuvo presente en forma de capa monomolecular y por lo tanto es muy difícil que migre hacia el exterior del alimento pues se encuentra unida por fuerzas covalentes.

Conforme la actividad de agua aumentó a niveles de 0.4 aproximadamente se formaron capas adicionales de moléculas de agua a la capa monomolecular ya establecida y estas estuvieron obligadas a migrar al exterior.

Y para actividades de agua mayores a 0.6 existió condensación capilar; la fracción de esta agua se encontraba en solución transportando a los diferentes componentes del alimento eliminándose más fácilmente en el proceso de desorción y en el de adsorción fué capturada como transportador y en solución.

### 3.3 VALORES DE MONOCAPA DE B.E.T. G.A.B. Y OTROS MODELOS

Se llevo a cabo el tratamiento de los resultados de las diferentes isothermas mediante métodos de linealización y mínimos cuadrados para obtener los coeficientes de las ecuaciones considerando como factor importante la desviación de los datos experimentales en función al modelo analizado, los resultados obtenidos son mostrados a continuación en el Cuadro 6 donde se muestra el RMS y el % de Error únicamente

Cuadro 6 Valores de RMS y ERROR% en Isothermas de Adsorción

MODELO	RMS 25°C	ERROR %	MODELO	RMS 35°C	ERROR%
OSWIN	19 988	16 729	GAB	27 980	26.152
CAURIE	21 636	19 090	BET	28.048	26.651
BET	23 825	21 721	OSWIN	29.638	27.742
HENDER SON	28 753	23 083	CAURIE	42.864	36.013
GAB	69 653	43 226	HENDERSON	49 099	36.250
KUHN	99 886	65 926	KUHN	100 000	78.211
SMITH	100 000	100 000	SMITH	100 000	100 000
BRADLEY	100 000	100 000	BRADLEY	100 000	100 000
IGLESIAS	100 000	100 000	IGLESIAS	100 000	100 000

RMS Error Relativo Medio



En el cuadro 6 podemos observar que los modelos OSWIN y CAURIE tuvieron un buen ajuste con porcentajes de error entre 19 - 21.5%, mientras que los modelos de GAB, BET y HENDERSON mostraron ajustes entre 21.5-28%, lo que nos hace considerarlo con un ajuste regular y los modelos de KUHN, SMITH, BRADLEY e IGLESIAS no fueron los adecuados para este tipo de producto.

Cabe además mencionar que debido a que la experimentación se llevó a cabo en condiciones atmosféricas normales influyendo en los resultados de la isoterma lo que se ve reflejado también en el ajuste los resultados a los modelos.

A pesar de que los modelos de OSWIN y CAURIE fueron los que mejor ajustaron no se les puede confiar mucho crédito debido a que son modelos que no ofrecen ninguna información sobre la ocurrencia del fenómeno.

Si analizamos el fenómeno con el modelo de GAB éste fue adecuado debido a que manejó un buen ajuste entre 0 a 0.9 de  $a_w$  y es muy versátil; además es recomendado por el grupo Europeo de Proyectos COST 90. En el caso del modelo de BET su aplicación se restringe para valores de  $a_w$  entre 0.05 a 0.4, máximo hasta 0.5, siendo su principal interés la determinación del valor de la capa monomolecular ( $X_0$ ) y el calor de sorción ( $Q_s$ ) el cual es muy importante para el procesamiento y almacenamiento de alimentos (Labuza 1968, Bizot 1983). Mientras que el de OSWIN es muy poco recomendable debido a su poca utilización.

De la misma forma que para el caso anterior en el Cuadro 7 se muestran los RMS y % de Error para las isotermas de desorción. Aquí se puede observar claramente que los modelos de BRADLEY, OSWIN, CAURIE, SMITH, IGLESIAS y HENDERSON se ajustaron adecuadamente al comportamiento de la isoterma sin embargo estos modelos no dieron una clara y precisa explicación del fenómeno que acontece en el proceso de sorción para el cereal de maíz en hojuela por eso como se observó el

modelo de GAB también se ajustó al isoterma, el cual es versátil y se utiliza para un amplio intervalo de  $a_w$ , y además proporcionó una visión más clara de los que sucede con el cereal y el fenómeno de sorción.

Cuadro 7. Valores de RMS y ERROR% en Isotermas de Desorción

MODELO	Desorción 6 °C		Desorción 25°C		Desorción 35 °C	
	RMS	ERROR %	RMS	ERROR %	RMS	ERROR %
BRADLEY	13.439	9.736	9.477	7.064	20.083	13.724
CAURIE	12.742	10.280	17.146	12.564	9.934	8.369
GAB	9.747	8.984	10.626	8.854	12.786	10.942
HNDSON	14.283	10.199	10.704	8.578	13.244	10.517
IGLESIAS	15.530	14.425	20.017	16.005	21.794	19.231
OSWIN	24.907	18.778	29.631	14.333	25.722	20.071

### 3.3.1 Valores de Humedad de Monocapa.

Después de llevar a cabo el análisis del ajuste de diferentes modelos, se tomo la humedad de monocapa de B.E.T. para analizar en adsorción y desorción, ya que de acuerdo al marco teórico, esta corresponde a la humedad de máxima estabilidad del producto con lo que se puede seleccionar un material de empaque que permita conservar el producto por mayor tiempo, sin embargo en este trabajo únicamente se realizará el análisis en función a las propiedades termodinámicas. En el Cuadro 8 se muestran los resultados obtenidos para adsorción a 25 y 35 °C, mostrándose además el valor de la constante y el contenido de humedad que le corresponde de acuerdo a la isoterma obtenida. En este cuadro se observa que cuanto mayor sea la temperatura menor será el contenido de humedad a la que se debe almacenar el producto.

Cuadro 8 Valores de Humedad de Monocapa para Adsorción

	25°C	35°C
C	3.6556	1.172
Xo	0.0290	0.0153
Contenido de Humedad (g de agua/g de s.s)	2.90	1.53

C= Constante de BET. Xo= Valor de humedad de monocapa

Los valores de humedad de monocapa mostraron que el punto de mayor estabilidad del producto se encontró entre los rangos de humedad de 1% a casi 3%, indicando también que fué el valor que se encontró formado en capas moleculares y que por ningún proceso de deshidratación es posible ya eliminar esta agua ligada fuertemente a los constituyentes alimenticios.

En el Cuadro 9 se muestran los valores de monocapa para desorción de las muestras a diferentes temperaturas.

Cuadro 9 Valores de Humedad de Monocapa Desorción

	6°C	25°C	35°C
C	22.270	10.271	8.420
X <sub>o</sub>	0.0596	0.0535	0.0407
Contenido de Humedad (g de agua/g de s.s.)	5.96	5.35	4.07

C= Constante de BET

X<sub>o</sub>= Valor de humedad de monocapa.

Al igual que para el fenómeno de Adsorción se observó que el punto de máxima estabilidad del producto se encontró en intervalos bajos de contenido de humedad, para este caso se localiza entre 4% a casi 6% humedad, mostrando que en este punto se encuentra que el cereal es menos susceptible a cambios con respecto a la humedad relativa que circunde alrededor del producto y por lo tanto se garantiza un mayor tiempo de vida útil del producto.

La humedad de monocapa (X<sub>o</sub>) es mayor en el caso de desorción que para el caso de adsorción debido a que el material fue previamente hidratado y por lo tanto su estructura ya se encontraba modificada con respecto a los sitios (poros) de sorción y el fenómeno de desorción es lento, y los componentes mayoritarios sufren daños irreversibles cambiando los sitios de sorción y generándose nuevos sitios de sorción que no pudieron efectuar la desorción, debido principalmente al bucle de histéresis que se realiza antes de la humedad de monocapa y que el alimento tiene que recorrer en sentido inverso durante la desorción.

### **3.4 PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL AGUA EN CEREAL DE MAIZ EN HOJUELA**

Las propiedades termodinámicas a analizar son las que se derivan del análisis de Clausius Clapeyron tal y como se menciona el capítulo 2, a continuación se describirá el comportamiento de los calores de sorción obtenido a contenido de humedad constante con las temperaturas estudiadas y realizando un barrido de la isoterma.

#### **3.4.1 Calores de Sorción**

En la Figura 9 se muestran los calores de Adsorción obtenidos a humedades constantes de 2% a 60% y a las diferentes temperaturas de estudio, los datos obtenidos mostraron una tendencia desordenada de la cantidad de energía ( $Q_s$ ) que requieren los sitios de adsorción al agua; esto debido probablemente a que como el alimento al inicio tiene una gran capacidad y sitios en donde adsorber el vapor de agua circundante del microambiente; posteriormente conforme aumenta la cantidad de agua adsorbida hasta un 60% se vio reducido considerablemente el calor de adsorción y esto pudo suceder debido a que tanto las macromoléculas y las moléculas de bajo peso molecular estaban saturadas de agua adsorbida; y por último de los datos obtenidos se apreció una tendencia baja pero constante del calor de sorción necesario (a humedades de 8 a 60%) para adsorber agua; indicando que a altas humedades se necesita muy poca cantidad de energía para adsorber agua del medio haciendo por lo tanto más susceptible a deteriorar al alimento.

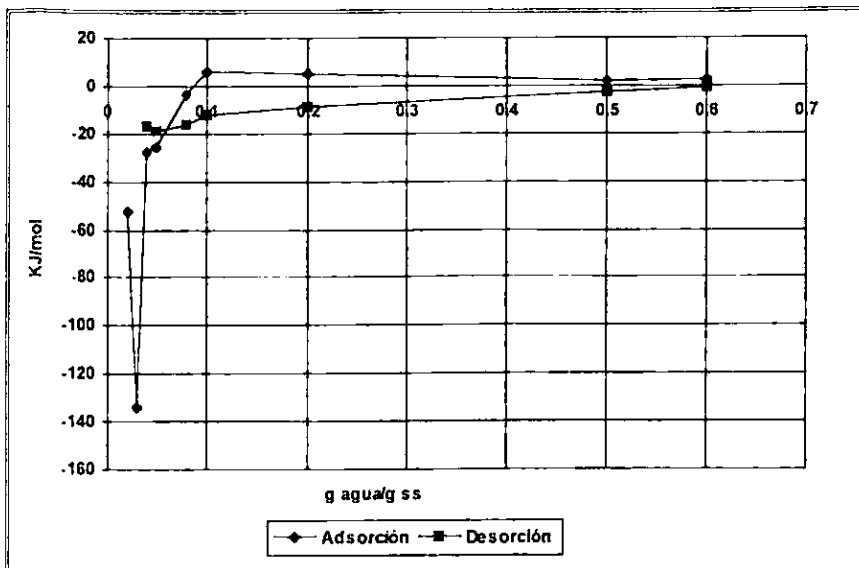


Figura 9. Calores de Adsorción en Cereal de maíz en hojuela.

En la Figura 9 se muestran los calores de desorción presentados por el cereal de maíz en hojuela, de donde se observa que la energía necesaria para desadsorber el agua es mucho menor que la requerida para adsorberla de aquí se explica entonces el porque el alimento debe ser almacenado a condiciones constantes ya que durante la adsorción se producen modificaciones que provocan que el proceso no sea totalmente reversible.

Cuando el alimento con un alto contenido de humedad se expone a las diferentes actividades de agua va perdiendo agua de una manera rápida y sin mucho requerimiento de energía que genere este proceso, y en cuanto el contenido de humedad llega a niveles cercanos al valor de humedad de monocapa entonces ya no hay más agua que ceder al medio por lo tanto el calor requerido para provocar la desorción del agua enlazada en el alimento se hace mucho mayor para poder remover esas trazas de agua que aún quedan atrapadas en el cereal.

El alimento con un contenido de humedad del 25% presentó enlaces débiles entre el agua y los componentes del alimento como son almidones y azúcares de bajo peso

molecular bajo, y por lo tanto fué muy fácil remover esta agua con un requerimiento mínimo de energía para efectuarse; sin embargo cuando el alimento fué perdiendo agua de las multicapas y se llegó al agua monomolecular entonces la cantidad de energía para poder remover esta agua aún atrapada se hizo mucho mayor debido a la fuerza de enlace entre las moléculas de monocapa.

### 3.4.2 Entalpías de Sorción

En la Figura 9 se muestran las entalpías para adsorción y desorción del cereal. de esta figura se observa que no existe diferencia significativa en el comportamiento de las entalpías cuando el contenido de humedad es superior a 0.06 g de agua/g de sólido seco, sin embargo a humedades comprendidas entre 0.03 y 0.05 se muestran diferencias significativas, siendo mucho mayor la energía requerida para producir un cambio entalpico en el caso del fenómeno de adsorción, presentando el mayor cambio entalpico a contenidos de humedad de 0.03 g de agua/ g de sólido seco donde se requiere una energía de -177.62 kJ/mol, para producir un cambio. correspondiendo este a la humedad de monocapa o máxima estabilidad, en el caso del fenómeno de desorción a estas humedades es de -24.48 kJ/mol, ya que el alimento ha sido sometido a una adsorción de humedad y posteriormente a una desorción, de tal manera que muchos de los cambios producidos son irreversibles.

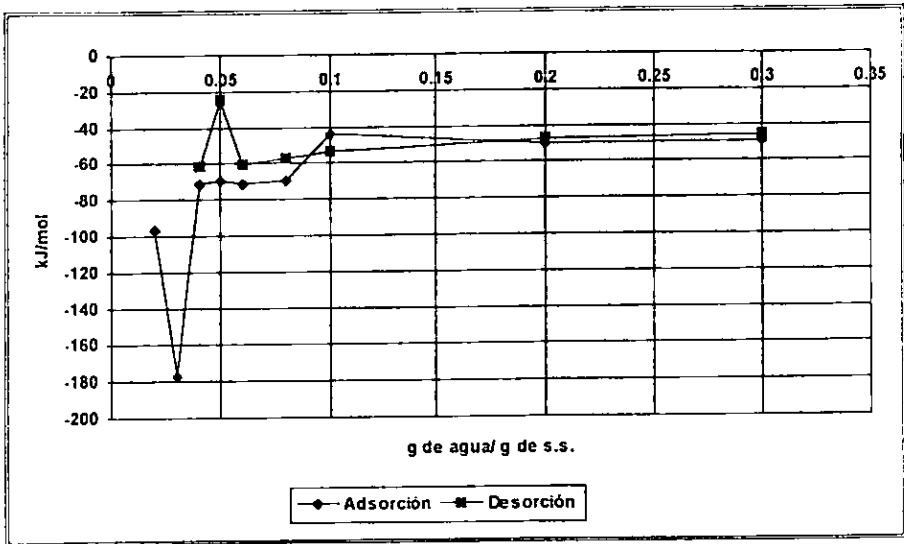


Figura 10. Curva de Entalpía de Sorción de Cereal de Maíz en Hojuela.

Los valores de  $\Delta H$  correspondientes al Cereal de Maíz en Hojuela muestran que la entalpía no varió significativamente con respecto a la temperatura ó que fueron

esencialmente constantes en el intervalo de temperatura considerado; la entalpía pudo tomarse como un valor promedio para el fenómeno de Adsorción.

En el caso del fenómeno de desorción no se observó variación significativa de las entalpías a las diferentes temperaturas de estudio, indicando que no existe variación de la entalpía de sorción con respecto al cambio de temperatura; por lo tanto se pudo establecer una entalpía promedio para el estudio de las isotermas. En el Cuadro 10 se muestran las entalpías de relajación para el proceso de adsorción desorción de agua lo ayuda a mostrar la irreversibilidad de los procesos, teniendo repercusiones directas en su calidad, si el material de envase no ha sido seleccionado adecuadamente tomando en consideración el transporte y distribución del producto.

Cuadro 10 : Valores de Adsorción/Desorción: Calores y Entalpías.

	CALOR DE SORCION KJ/mol		ENTALPIA SORCION KJ/mol		ENTALPIA RELAJACION
	Adsorción	Desorción	Adsorción	Desorción	
Humedad					
0.02	52.58152	-16.5850	-96.51152	-61.34250	-35.16901
0.03	133.6912	-18.4855	-177.6292	-24.48559	-153.1436
0.04	-27.4321	-16.1280	-71.37014	-60.91204	-10.45809
0.05	-25.2856	-12.3212	-69.22366	-57.10523	-12.11843
0.08	-3.52261	-8.84184	-43.94152	-53.62584	-9.684317
0.1	-5.82904	-2.65005	-49.76704	-47.43405	-2.332990
0.2	-5.51102	-0.56872	-49.44902	-45.35272	-4.096297

Los calores de adsorción fueron mayores que los obtenidos para desorción a las diferentes temperaturas y a contenidos de humedad constantes; esto pudo deberse a que el material alimenticio manejado tiene una gran higroscopicidad y puesto el almidón es uno de sus componentes mayoritarios; al estar en contacto sus grupos oxhidrilos con el vapor de agua circundante es muy viable que haya capturado una mayor cantidad de agua que estaba a su alrededor; para la desorción hubo menos requerimientos de energía puesto que se trata de un proceso de desgelificación del almidón, y el hecho de que sean valores negativos se debe a que el alimento hidratado está a su máxima capacidad y entonces al someterlo a  $a_w$  bajas existe una pérdida acelerada de agua hacia el ambiente y es casi constante en todo el proceso.



de desorción debido a que la estructura del cereal ya fue modificada previamente y por lo tanto tiene una superficie homogénea y la pérdida de agua fue moderada y constante desde el inicio hasta el valor de 0.25 de humedad.

Como se puede observar en el Cuadro 10, la entalpía de sorción tuvo una declinación marcada negativa de la entalpía a niveles por debajo de 0.05 del contenido de humedad del alimento, esto se explicó tal como lo mencionan Suekarto y Steinberg (1981) que en un estudio encontraron un comportamiento similar al que se obtuvo aquí, en el cual se manifiesta claramente que existe una ruptura que corresponde al estado de transición del tipo de enlace del agua ligada al alimento: dividiendo a los enlaces del agua del alimento en tres estados transitorios como son: primario, secundario y terciario, siendo de mucha importancia el estado secundario pues es aquí en donde existe un proceso de sorción exotérmico esto es una pérdida ligera debida a la condensación de agua con comportamiento similar a la del agua pura (Brunawer, 1945). Y en el sitio terciario se encuentra que la energía de enlace pudo ser muy poco resistente casi como el calor de condensación del agua pura a la misma temperatura

### **3.4.3 Energía libre de Gibb's**

En la Figura 10 se muestra el comportamiento de la energía libre de Gibb's durante el proceso de adsorción/desorción, siendo mayor para el fenómeno de adsorción que para el de desorción, teniéndose además una tendencia similar

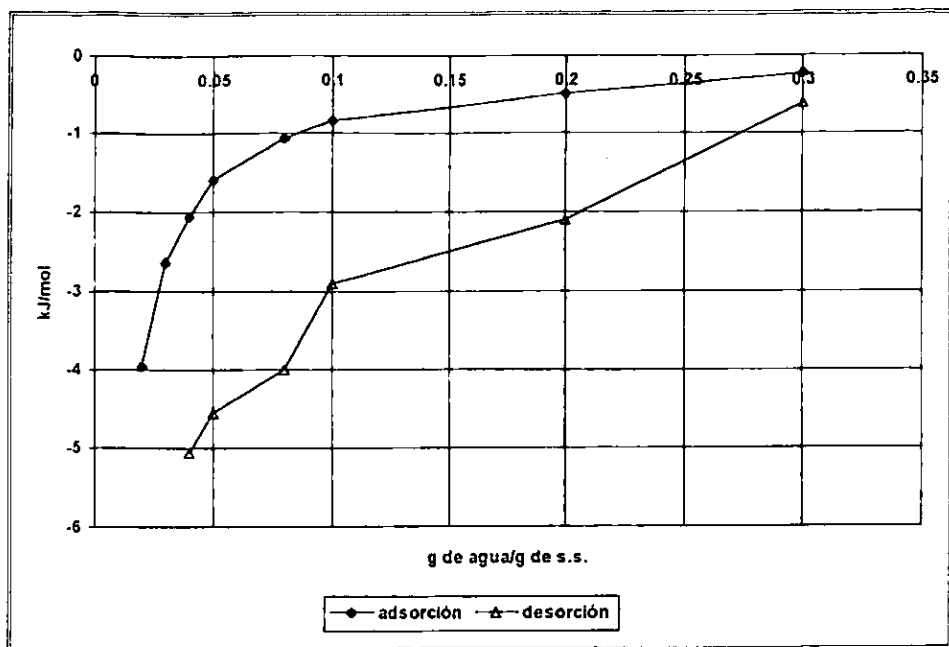


Figura 11 Curva de la Energía Libre de Gibbs

Se observó un gran requerimiento de energía a niveles bajos de  $a_w$  0.02 hasta el valor de monocapa de alrededor de 0.3 de humedad, esto debido a que el cereal se encontraba deshidratado y al contacto con el agua del ambiente hubo una gran captación de agua por parte del cereal.

A humedades por debajo del valor de monocapa se observó que el valor de la energía libre de Gibb's es negativo debido a que al exponer al producto a niveles de  $a_w$  bajas y con una cantidad excesiva de agua dentro de su matriz celular se generó una acelerada pérdida de agua del cereal, y se observa que casi al llegar a niveles cercanos a 0.3 de contenido de humedad sigue siendo negativa pero el valor muy por debajo del inicial al que se expuso el cereal a la  $a_w$  baja, indicándose con esto que no se necesitó una gran cantidad de energía para que se llevara a cabo el proceso de desorción.

### 3.4.4 Entropía de Sorción

En la Figura 11 se presenta la curva de entropía de sorción, esta proporcionó información de la energía del desorden molecular, a bajos niveles de humedad se observa un gran requerimiento de energía para poder llevarse a cabo la captura del agua del ambiente por las moléculas del alimento en los diferentes sitios aleatorios de adsorción y conforme el agua quedaba atrapada en las macromoléculas del cereal este requerimiento de energía era menor.

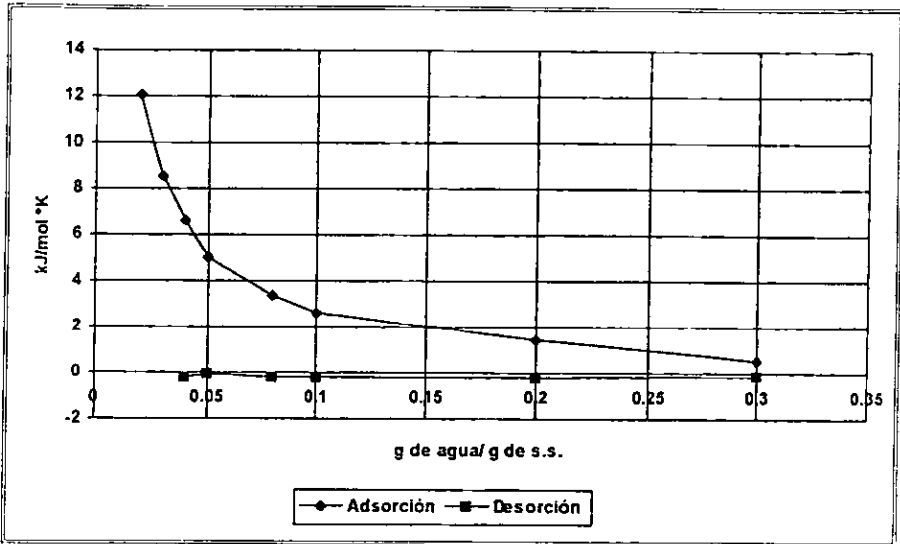


Figura 12 Curva de la Entropía de Sorción en Cereal de Maíz en Hojuela.

Para el caso de la entropía se observó una tendencia similar de los valores negativos para las diferentes temperaturas de estudio, esto se explica debido a que se refiere al agua adyacente a la capa monomolecular la cual esta ligada en forma de puentes de hidrógeno y por lo tanto su energía de enlace es más débil haciendola fácil de eliminar del producto.

La entropía del agua adsorbida declina marcadamente conforme aumenta el contenido de humedad, desde un 2% hasta un 15% y de ahí en adelante desciende más lentamente; esto es debido probablemente a que alcanza la entropía del agua

líquida libre. Estos resultados son semejantes a los obtenidos por Guilbot y col. (1961), los cuales encontraron discontinuidad al utilizar rayos-X para el mismo comportamiento a contenidos de humedad de 9% a 15% de agua en almidón.

Bettelheim y col. (1970) dio una explicación de este fenómeno termodinámico: a bajos contenidos de humedad, el agua se adsorbe en una forma más accesible en la superficie externa del sólido; conforme el contenido de agua aumenta, los polisacáridos abren sus sitios de energía para enlazarse con el agua.

## CONCLUSIONES

- El comportamiento de la isoterma tanto en el proceso de adsorción como desorción muestran claramente que el cereal tiene una estabilidad de sorción de agua a niveles de 0.5 a 0.3 de  $a_w$ , indicando con esto que el cereal es menos susceptible a deterioro a niveles de humedad por debajo del 3%..
- Con los métodos de BET y GAB, se obtuvieron valores importantes tales como el valor de humedad de monocapa obtenido por el método de BET y utilizando el método de GAB se pudieron calcular las propiedades termodinámicas (Calor de Sorción, Entalpía de Sorción, Energía libre de Gibb's, Entropía de Sorción, Entalpía de Compensación y Calor de Compensación).
- Los calores de sorción del cereal de maíz en hojuela corroboraron la misma tendencia que el estudio de humedad de monocapa, siendo que a bajas actividades de agua y con una humedad relativa controlada se tiene un consumo y desprendimiento de energía mayor. Indicando por tanto que, los componentes mayoritarios del cereal tienen un mayor esfuerzo para poder capturar agua del medio que circunde al cereal a bajas actividades de agua y para el caso de Desorción ocurre que al llegar a actividades de agua bajas el cereal ya no puede desprender agua, pues esta se encuentra ligada a los constituyentes como parte de ellos y no en solución o componente para el caso del agua ya liberada.
- De acuerdo al análisis realizado se concluye que los factores que tienen una mayor influencia sobre la vida de anaquel del Cereal de Maíz en Hojuela son: la temperatura, la humedad relativa, la actividad de agua; por lo que es indispensable llevar un control adecuado sobre éstos para evitar la aceleración del deterioro, y así poder mantener por más tiempo en buen estado el producto para beneficio del consumidor.
- Entre los factores más importantes a considerar para obtener el punto de estabilidad del producto como ya se dijo es la humedad relativa y la actividad de agua. estas deben controlarse para garantizar buena calidad de almacenamiento del cereal, obviamente el cereal ya tiene destinado un empaque y envase adecuados pero no se debe exponer a humedades relativas y temperaturas altas

puesto que provoca alteraciones del producto aunque éste se encuentre protegido.

- El método experimental para evaluar las isotermas de sorción de humedad proporcionó buenos resultados, sin embargo la gran desventaja que este presenta radica en que se debe evitar condensación excesiva a temperaturas de más de 30°C; efectuar la saturación de las sales tal como indican las recomendaciones pues si no se realiza de este modo habrá migración de la sal al producto.
- El otro factor fundamental es la temperatura de almacenamiento la cual debe cuidarse de una manera especial puesto que la atmósfera creada particularmente para el producto se puede perder por una mala dirección de la temperatura a lo largo de la cadena de comercialización y por lo tanto de nada valdría tener al producto a una humedad relativa controlada y a una actividad de agua determinada puesto que aún así se generarían alteraciones y pérdidas del producto.
- El calor de sorción es un indicador conciso de que la estabilidad del producto se encuentra a temperaturas moderadas actividades de agua bajas y humedades relativas moderadas; puesto que según, los datos arrojados la máxima cantidad de energía del producto para el proceso de sorción se encontró a humedades por abajo de 0.3 de  $a_w$  y humedad relativa menor al 30%.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguerre R. J., Suárez C and Viollaz P. E. (1984). "Calculation of the Variation of the Heat of Desorption with Moisture Content on the Basis of B.E.T. theory". J. Food Tech (19). pag 325 331.
- Cadden A. M. (1988). "Moisture Sorption Characteristics of Several Food Fibers" J. Food Sci Vol 53 (4); pag 1150-1155.
- Caurie M. (1981), " A Monolayer Equation for use in Sorption Studies". J. Food Sci Vol 47, pag 332 - 333.
- Cheftel and Cheftel (1976) "Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos". Ed. Acribia. pag 17-40.
- Chirife J, Suárez C. and Iglesias H. A. (1986). "Technical Calculation of the Heat of Water Sorption in Foods on the basis of B.E.T. Theory ". J. Food Tech. 21, pag 103 - 107.
- Dieter B. H. (1985). " Química de Alimentos". Ed ACribia. Segunda Edición.
- Dual N, H. (1993) "Adsorption of Water on Cereal-Bread Type Dietary Fibers".J. Food Eng. 20: 17-43.
- Duckworth R. B. (1974) "Water Relations of Foods". Proceeding of an International Held in Glasgan, Sep 1974. Academic Press 1975. U.S.A.
- Escamilla P. V (1996) "Aplicación del Secado por Aspersión para la Obtención de Extracto de Yuca en Polvo" . TESIS. FES CUAUTITLAN. UNAM
- Fennema O R. (1980). "Química de los Alimentos" Edit. Acribia, S. A. España 1993.
- Hubinger M, Menegalli F. C., Aguerre R. J. and Suárez C. (1992). "Water Vapor Adsorption Isotherms of Guava, Mango and Pineapple". J. Food Sci Vol 57 (6). pag 1405 1407.

- Iglesias H. A. and Chirife J. (1984). "Correlation of B.E.T. Monolayer Moisture Content in Foods with Temperature". J. Food Tech 12, pag 503-506.
- Iglesias H. and Chirife J. (1976). " Equilibrium Moisture Contents of Air Dried Beef Dependence on drying tempetature" J. Food Tech. (11), pag 565 - 573.
- Jamieson M. y Jobber P. (1975) "Manejo de los Alimentos". Ecología del almacenamiento. Vol. 1 Ed. Pax-México. Pag 123-149.
- Karel, M. (1975) "Water Activity and Food Preservation, In: Principles of Food Science . Part II: Physical Principles of Food Preservation", Carel. M. Fennema, O. R. I Lund, D. B. Edited by Marcel Dekker, pag 237, 263.
- Kent N. L. (1971). "Tecnología de Cereales. Editorial Acribia, Zaragoza España. Pag 36 - 38. Y 215 - 230.
- Kitic D. Pereira D. C.; Faretto G; Resnik S. y Chirife J; (1986). "Theoretical Prediction of the Water Activity of Standard Saturated sal Solutions at varios Temperatures". J. Food Sci Vol 51 (4), pag 1037 - 1041.
- Labuza T. P. (1980) " The Effect of Water Activity on Reaction Kinetics of Food Determination". Food Tech 34(4) pag 36-41.
- Labuza T. P., Kaanane, and Chen J. Y . (1985). " Effect of temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift Two dehidrated Foods" J. Food Sci Vol 50, pag 385 - 391.
- Lang C. W. and Sternberg M. P. (1981). "Linearization of the Water Sorption Isotherm for Homogeneous Ingredients over  $a_w$  0.3 - 0.95". J. Food Sci Vol 46. pag 1450 - 1452.
- Maroulis Z. B Tsami E. Marinou-Kouris D. and Saravacos G. D. (1988) " Application of the G.A.B. model to the Moisture Sorption Isotherms of Dried Fruits" Journal of Food Engineering, pag 63-78.



- Martín P. M. y Romero B. (1993) "Importancia de la Determinación de Isotermas de Sorción en el Estudio de la Permeabilidad de Vapor de Agua de Materiales de Empaque Biodegradables". Primer Congreso Nacional de Temas Selectos de Química y Biotecnología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Mazza (1986). Technical note: " Sorption Isotherms and Monolayer Moisture Content of raw peas, and peas dehydrated after pressure cooking". J. Food Tech Vol 21, pag 503 - 507.
- Peleg M. (1988). "An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves". J. Food Sci Vol 53 No. 4, pag 1216 - 1217.
- Rizvi S. S. H. and Benado A. L. (1984) " Thermodynamic properties of dehydrated foods" Food Technology pag 83-92.
- Rockland L. B. and Beuchat L. R. (1986) "Water Activity: Theory and Applications to Food. Basic Symposium, Chicago Illinois 1986. pag 173-207.
- Saguy I. and Drew Buuce (1987). "Statical Calibration of Instruments Using Water Activity Determination As And Example". J. Food Sci. Vol 52 (3),pag 767 - 771.
- Saravacos G. D. and Stinchfield R. M. (1965) "Effect of Temperature and Pressure on the Sorption of Water Vapor By Freeze-Dried Food Materials". Journal Of Food Science 30. Pag 779-786.
- Villota R. Saguy I and Karel M. (1980). " An Equation Correlating Shelf Life of Dehydrated Vegetable Products with Storage Conditions" J. Food Sci 45, pag 398-401