

# SEP INSTITUTO TECNOLÓGICO de celaya

I.Q./059/98

Asunto: Aprobación de Impresión  
de Tesis de Maestría

6 de marzo de 1998.

Dr. Rafael Chávez Contreras  
Jefe del Depto. de Ingeniería Química.  
P r e s e n t e

De acuerdo con la convocatoria hecha por esa Jefatura a su digno cargo con el fin de determinar la aprobación de impresión del Proyecto de Tesis de Maestría, titulado: "**DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR DURANTE EL SECADO DE HOJUELAS DE AVENA**" presentado por el **Ing. Angel Sandoval Jacobo**, comunico a usted que esta Comisión Revisora de tesis ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

Lo anterior, para los efectos consiguientes.

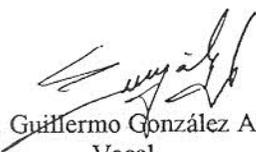
Atentamente



Dr. Pedro Alberto Quintana Hernández  
Presidente



Dr. Rafael Chávez Contreras  
Secretario

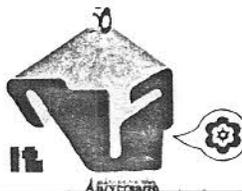


Dr. Guillermo González Alatorre  
Vocal



Dra. Gloria María Martínez González  
Suplente

\*llc



# DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR DURANTE EL SECADO DE HOJUELAS DE AVENA.

Por : Angel Sandoval Jacobo

## RESUMEN

En el presente trabajo se analizan los efectos de la temperatura y velocidad de aire en el secado de hojuelas de avena. Se analizaron cuatro niveles de temperatura (45, 60, 75 y 90°C) y dos de velocidad de aire (1.0 y 1.6 m/s). Se utilizaron hojuelas de avena comercial, que recibieron un pretratamiento de secado a una temperatura de 96°C y 25 mm de Hg. A las hojuelas secas se les proporcionó una humedad inicial de 1.8 kg de agua/kg de sólido seco y se analizaron en un secador de túnel con charolas y en un termoanalizador. Se obtuvieron las curvas de secado experimentalmente y se calcularon los coeficientes de transferencia de calor, de masa y los perfiles de difusividad efectiva durante el secado. Además, se analizaron dos modelos para las curvas de pérdida de humedad: exponencial y suma de exponenciales. Los modelos aplicados fueron ajustados por el paquete NCSS97, los cuales predecían la pérdida de humedad, pero fallaban al derivar el modelo y obtener la velocidad de secado. En los perfiles de difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ), se observó que la  $D_{eff}$  aumentaba cuando se reducía el contenido de humedad indicando que los mecanismos de transferencia de masa, además de difusión de líquido, también incluían difusión de vapor.

Dirigida por: Dr. Pedro Alberto Quintana Hernández

## ***DEDICATORIAS***

**A DIOS:** por lo que de él he recibido: la vida, mi familia, la amistad.

**A MIS PADRES :**

María Jacobo Ortíz y Bartolo Sandoval Balmaceda

Con todo cariño, respecto y admiración, por todo su esfuerzo e invaluable apoyo que me han brindado durante toda mi vida.

**A MIS HERMANOS :**

Felipe, Ma. Isabel, Roberto †, Jesús, Modesta, Micaela, Mario, Emilio y Ma. Guacalupe.

Por todo el apoyo que me han brindado para que continúe superándome. Sin omitir a mis cuñados y cuñadas que forman parte de mi familia.

**A MI ABUELITA:** Sara Ortíz Bahena †, por todos los sabios consejos que dió.

A todos mis **SOBRINOS**, que los quiero mucho.

## ***AGRADECIMIENTOS***

Con admiración y respecto a mi asesor:

**Dr. Pedro Alberto Quintana Hernández**

Por la orientación y apoyo brindado en la realización de esta tesis. Además, quiero agradecer a su esposa Erika, por su amistad.

A los **Drs. Rafael Chávez Contreras, Guillermo González Alatorre y Gloria María Martínez González**, por sus comentarios y colaboración como sinodales en esta tesis.

A los profesores que en las aulas transmiten sus conocimientos: Dr. Francisco Javier Alvarado, Dr. Ramiro Rico M., Dr. Guillermo González A., Dr. Alejandro Gómez, Dr. Fernando Tiscareño L., Dr. Pedro A. Quintana H., Dra. Gloria María Martínez y Dra. Cristina Coronado.

A mis compañeros de generación: **Vladimir, Cesar, Pedro, Guillermo, Mauricio, Julio, José Luis, Ernesto y Leticia**, por su amistad, y por todas las vivencias compartidas.

Con mucho respecto a Juan y Lilia, por su amistad y apoyo incondicional.

A todos mis amigos, que durante la estancia en este lugar me apoyaron de una u otra manera: José Luis (el pochis), Jacinto, Gerardo, Rocío, Fabiola, Ruy, Glafiro Ramón Alfaro, Arturo, Argentina, Ramón, Raúl, Blanca, Chetos, Alejandro P., Eriberto, Silvia, Valentin, Juan Pablo, Alberto, Juan Manuel (el guaraní), Victor A., Botello, Miguel Pantoja, Eusebio, Luis Ignacio, Juan Barajas, Alex, Raquel y Claudia

A los encargados del laboratorio y almacén: Julio Rocha, don Lupe, don Juve, don Tito y don Chava.

A mis amigos: José Luis, Adrián y Esperanza, por sus consejos y apoyo para la realización de esta tesis.

A mis amigos de Celaya: Maday, Ana, Lili, Paty, Clementina, Claudia, Francisco, Ma. Del Carmen, Fabiola y Delfino, Elena y Manuel. Con cariño especial a Concha, Alicia y su familia, gracias por ser mis amigos.

A mis amigos: Ignacio, Carlos, Hector y Gilberto

A Lety, Gloria, July y Lorena, por su amistad, y disponibilidad de al momento de solicitar ayuda.

A CONACyT por el apoyo económico brindado.

A todos aquellos que de alguna forma me brindaron apoyo para la realización de este trabajo.

## CONTENIDO

<b>Resumen</b>	i
<b>Contenido</b>	ii
<b>Lista de Figuras</b>	v
<b>Lista de Tablas</b>	vii
<b>Nomenclatura</b>	viii

### **CAPITULO I INTRODUCCION.**

1.1. Objetivos.	2
1.2. Justificación.	2
1.3. Descripción del trabajo.	3

### **CAPITULO II ASPECTOS TEORICOS DE SECADO.**

2.1. Definición de secado.	4
2.1.1. Humedad.	5
2.1.2. Isotermas de sorción.	6
2.2. Velocidad de secado.	6
2.3. Cálculo de la velocidad de secado.	10
2.3.1. Remoción de humedad en el periodo de velocidad constante.	10
2.3.2. Efecto de las variables sobre la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante.	16
2.3.3. Remoción de humedad en el periodo de velocidad decreciente.	17
2.3.3.1. Transporte de humedad causado por difusión líquida.	18
2.3.3.2. Transporte de humedad causado por acción capilar.	19
2.3.4. Cálculo de la difusividad en el periodo de velocidad decreciente.	20
2.4. Proceso de elaboración de hojuelas de avena.	22
2.5. Proceso de secado en los alimentos.	24

### **CAPITULO III EQUIPO Y MODELOS DE SECADO.**

3.1. Métodos generales de secado.	27
3.2. Secador de túnel con charolas.	27
3.2.1. Preparación de las muestras para pruebas en el secador de túnel con charolas.	28
3.2.2. Diseño de experimentos para el secador de túnel con charolas.	30
3.3. Análisis térmico.	32
3.3.1. Analizador térmico stanton redcroft STA 780.	33
3.3.2. Preparación de las muestras para el analizador térmico.	34
3.3.3. Diseño de experimentos para el termoanalizador.	34
3.4. Modelos de secado.	35

### **CAPITULO IV DISCUSION DE RESULTADOS.**

4.1. Curvas de secado obtenidas en el secador de túnel con charolas.	39
4.2. Efecto de la velocidad de aire sobre la pérdida de humedad.	41
4.3. Obtención de las curvas de velocidad de secado.	42
4.4. Aplicaciones de los modelos de secado.	45
4.5. Curvas de secado obtenidas en el termoanalizador.	48
4.6. Curvas de velocidad de secado obtenidas en el termoanalizador.	49
4.7. Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor obtenidos en secador de túnel con charolas.	51
4.8. Cálculo de los coeficientes de transferencia de masa obtenidos en secador de túnel con charolas.	54
4.9. Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor obtenidos en el termoanalizador.	62
4.10. Cálculo de los coeficientes de transferencia de masa obtenidos en el termoanalizador.	64

### **CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

5.1. Conclusiones.	66
5.2. Recomendaciones.	67

## **APENDICES**

Apéndice A. Características en el secador de charolas.	69
Apéndice B. Características del termoanalizador STA-780.	70
Apéndice C. Parámetros de los modelos.	73

<b>REFERENCIAS.</b>	76
---------------------	----

## LISTA DE FIGURAS.

	Página
1.1. Curva típica de secado.	7
1.2. Curva de velocidad de secado en función del tiempo.	8
1.3. Curva de velocidad de secado en función de la humedad.	8
4.1. Curva de pérdida de humedad en el secador de túnel con charolas a una velocidad de aire de 1.6 m/s.	40
4.2. Curva de pérdida de humedad en el secador de túnel con charolas a una velocidad de aire de 1.0 m/s.	40
4.3. Curva de pérdida de humedad a diferentes velocidades de aire para las temperaturas de 90 y 60°C.	41
4.4. Curva de pérdida de humedad a diferentes velocidades de aire para las temperaturas de 75 y 45°C.	42
4.5. Curvas de velocidad de secado para una velocidad de aire de 1.6 m/s.	43
4.6. Curvas de velocidad de secado para una velocidad de aire de 1.0 m/s.	44
4.7. Comportamiento de los modelos, para curvas de pérdida de humedad para una temperatura de 90°C y 1.6 m/s.	45
4.8. Comportamiento de los modelos, para curvas de velocidad de secado para una temperatura de 90°C y 1.6 m/s.	46
4.9. Comportamiento de los modelos en una muestra saturada.	47
4.10. Curva de pérdida de humedad en el secado de hojuelas de avena utilizando el termoanalizador con una velocidad de aire de 0.78 m/s.	48
4.11. Curva de pérdida de humedad en el secado de hojuelas de avena utilizando el termoanalizador con una velocidad de aire de 0.34 m/s.	49
4.12. Curva de velocidad de secado de una hojuela de avena utilizando el termoanalizador y una velocidad de aire de 0.78 m/s.	50
4.13. Curva de velocidad de secado de una hojuela de avena utilizando el termoanalizador y una velocidad de aire de 0.34 m/s.	51
4.14. Coeficientes de transferencia de calor en el secado de hojuelas de avena,	

en el secador de túnel con charolas para una velocidad de aire de 1.6 m/s.	52
4.15. Coeficientes de transferencia de calor en el secado de hojuelas de avena, en el secador de túnel con charolas para una velocidad de aire de 1.0 m/s.	53
4.16. Difusividad efectiva durante el secado de hojuelas de avena, en el secador de túnel con charolas para una velocidad de aire de 1.6 m/s.	55
4.17. Difusividad efectiva durante el secado de hojuelas de avena para una temperatura de 90°C y 1.6 m/s.	56
4.18. Comportamiento del modelo de difusividad efectiva.	57
4.19. Coeficientes de transferencia de masa en el secado de hojuelas de avena, en el secador de túnel con charolas para una velocidad de aire de 1.6 m/s.	58
4.20. Coeficientes de transferencia de masa en el secado de hojuelas de avena, en el secador de túnel con charolas para una velocidad de aire de 1.0 m/s.	59
4.21. Curva de velocidad de secado, coeficientes de transferencia de calor y masa, y temperatura del material a 75°C y 1.6 m/s.	60
4.22. Curva de velocidad de secado, coeficientes de transferencia de calor y masa, y temperatura del material a una muestra sobresaturada.	61
4.23. Coeficientes de transferencia de calor obtenidos en el termoanalizador para una velocidad de aire de 0.78 m/s.	62
4.24. Coeficientes de transferencia de calor obtenidos en el termoanalizador para una velocidad de aire de 0.34 m/s.	63
4.25. Coeficientes de transferencia de masa obtenidos en el termoanalizador para una velocidad de aire de 0.78 m/s.	64
4.26. Coeficientes de transferencia de masa obtenidos en el termoanalizador para una velocidad de aire de 0.34 m/s.	65

## LISTA DE TABLAS

	Página
2.1. Composición de las hojuelas de avena.	24
3.1. Determinación de la cantidad de agua retenida.	29
3.2. Diseño de experimentos para el secador de túnel con charolas.	31
3.3. Clasificación de técnicas de análisis térmico.	32
3.4. Diseño de experimentos para el termoanalizador.	35
A.1. Parámetros del modelo exponencial.	73
A2. Parámetros del modelo exponencial (réplica).	73
A.3. Parámetros del modelo suma de exponenciales.	74
A.4. Parámetros del modelo suma de exponenciales (réplica).	74
A.5. Parámetros del modelo de difusividad efectiva.	75
A.6. Parámetros del modelo de difusividad efectiva (réplica).	75

## NOMENCLATURA

Letra	Descripción	Unidades
a,b,c	Parámetros de ajuste	
A	Area de la placa	$m^2$
B,C	Constantes modelo Smirnov	
$C_p$	Capacidad calorífica del aire	$kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
$C_s$	Calor húmedo	$kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
$D_{AB}$	Difusividad molecular	$m^2\ s^{-1}$
$D_{eff}$	Difusividad efectiva	$m^2\ s^{-1}$
erf	Función error	
G	Gasto másico	$kg\ hr^{-1}\ m^{-2}$
$G_1, G_2$	Constantes de secado (ecuación 3.5)	
h	Coefficiente de transferencia de calor	$kcal\ hr^{-1}\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$
$H_a$	Humedad del aire	kg de agua / kg de aire seco
k	Conductividad calorífica del aire	$kcal\ hr^{-1}\ m^{-1}\ s^{-1}$
$k_g$	Coefficiente de transferencia de masa	$kgmol\ m^{-2}\ s^{-1}$
$k_1, k_2$	Parámetro de ajuste (ecuación 3.5)	
K,P	Constantes del modelo de Smirnov	
l	Longitud de la placa	m
m	Masa seca del sólido	kg
M	Humedad del alimento (ecuación 3.3)	kg de agua / kg de aire seco
$M_o$	Humedad inicial (ecuación 3.3)	kg de agua / kg de aire seco
$M_e$	Humedad de equilibrio (ecuación 3.3)	kg de agua / kg de aire seco
$M_{pro}$	Humedad promedio (ecuación 3.3)	kg de agua / kg de aire seco
$R_c$	Velocidad de secado	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
r	Espesor de la placa	m
t, $t_f$	Tiempo y tiempo final de secado	s
$T_a$	Temperatura del aire	$^\circ C$

$T_s$	Temperatura de la superficie de la placa	$^{\circ}\text{C}$
$U$	Coefficiente global de transmisión de calor	$\text{kcal hr}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
$v$	Velocidad del aire	$\text{m s}^{-1}$
$W$	Humedad del sólido (modelo de Smirnov)	kg de agua/kg de sólido seco
$W_o$	Humedad del sólido (modelo de Smirnov)	kg de agua/kg de sólido seco
$W_e$	Humedad del sólido (modelo de Smirnov)	kg de agua/kg de sólido seco
$X$	Humedad del sólido	kg de agua/kg de sólido seco
$X_a$	Humedad del aire	kg de agua/kg de aire seco
$X_s$	Humedad del aire saturado a $T_s$	kg de agua/kg de aire seco
$X_o$	Humedad inicial del sólido	kg de agua/kg de sólido seco
$X_e$	Humedad de equilibrio	kg de agua/kg de sólido seco
$X_r$	Humedad relativa del sólido	

#### Números Adimensionales

$Le$	Número de Lewis
$Nu$	Número de Nusselt
$Pr$	Número de Prandtl
$Re$	Número de Reynolds
$Sc$	Número de Schmidt
$Sh$	Número de Sherwood
$ Fo$	Número de Fourier

#### Letras Griegas

$\alpha$	Difusividad térmica	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
$\rho$	Densidad del aire	$\text{kg m}^{-3}$
$\mu$	Viscosidad del aire	$\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$\mu_w$	Viscosidad del aire a la temperatura de la pared	$\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$\tau_o, \tau$	Tiempo inicial y tiempo de secado (modelo de Smirnov)	s

## CAPITULO I. INTRODUCCION

Durante mucho tiempo, el secado que considerado como un arte o una rutina, más que como una disciplina científica debido a la complejidad de sus mecanismos y a la falta de una teoría global. Se sabe que las primeras aplicaciones de secado se realizaron en la era de Gutenberg en el secado de papel y algunas otras en el secado de madera para uso naval. Fue hasta 1929 cuando T. K. Sherwood realizó un desarrollo conceptual sobre los principios básicos sobre el secado, pasaron otros 50 años, en los cuales el desarrollo de secado solo tuvo pocas aplicaciones, llegando a 1978 para poder considerarse como una operación básica en Ingeniería Química (Bueno e Iglesias, 1993). Esto lleva a realizar una caracterización adecuada de los mecanismos de transferencia externa e interna y la identificación de los fenómenos que ocurren.

El secado de materiales constituye por lo general la operación final de un proceso, realizándose antes del envasado, aunque en algunos casos es parte esencial del proceso (fabricación de papel). Las principales razones por las cuales se aplica el proceso de secado son para reducir costos de transporte, obtener un material más manejable y evitar la presencia de humedad.

En éste trabajo se analizaron los efectos de las principales variables que afectan el secado de hojuelas de avena como son la temperatura y la velocidad de aire. Se utilizaron hojuelas de avena, a las cuales se les proporcionó cierto grado de humedad y se analizaron en un secador de túnel con charolas, obteniéndose las curvas de secado y curvas de velocidad de secado que nos permiten calcular los coeficientes de transferencia de masa y calor. Además de poder estudiar los mecanismos que se llevan a cabo durante el proceso de secado. También se utilizó un termoanalizador en el cual se analizó el secado de hojuelas de avena desde otro punto de vista, ya que solo se utilizó una hojuela de avena, y se pudieron observar los efectos internos y realizar una comparación con los datos obtenidos en el secador de túnel con charolas.

## 1.1 Objetivos

Los principales objetivos del presente trabajo son:

- Obtener las curvas de velocidad de secado de hojuelas de avena a diferentes temperaturas y velocidades de aire, utilizando un secador de túnel con charolas y un termoanalizador y analizar el efecto de estas variables en el proceso de secado.
- Comparar algunos modelos de secado a partir de la información dada por las curvas de velocidad de secado.
- Obtener los perfiles de difusividad efectiva durante el secado de hojuelas de avena.
- Calcular los coeficientes de transferencia de calor y masa durante el secado de hojuelas de avena.
- Realizar una comparación entre los resultados obtenidos en el secador de túnel con charolas y el termoanalizador.

## 1.2. Justificación.

La justificación de este trabajo se debe a que el secado se encuentra involucrado en diferentes industrias tales como la alimenticia (secado de frutos, legumbres, cereales, carnes y pescados), construcción (secado de fibras, maderas, ladrillos y mampostería), vestidos y necesidades sociales (secado en toda la línea textil y del cuero, barnices, secado de tabaco), secado de minerales y en acabado de plásticos. Una de las aplicaciones más importantes se lleva en la industria alimenticia previa al empaquetado, usándose como técnica de preservación de alimentos. Una cantidad mayor de humedad presente en los alimentos provoca crecimiento de microorganismos que generarán una descomposición más rápida de los mismos. Además la presencia de humedad permite que muchas enzimas reaccionen causando cambios químicos en los alimentos. Por lo que es necesario conocer la cantidad óptima de humedad para su almacenaje. Por ello el conocimiento de las bases

teóricas es indispensable para obtener las conclusiones necesarias de resultados de ensayos y poder incrementar las bases de esta operación en ingeniería química.

### **1.3 Descripción del trabajo.**

En el capítulo II, se establecen los aspectos teóricos generales sobre el secado, analizándose los principales métodos para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y masa. Se describe el proceso de elaboración de las hojuelas de avena y los efectos del secado en los alimentos. Dentro del capítulo III se describen los equipos utilizados en el desarrollo de la parte experimental de este trabajo, se establece el método como se prepararon las muestras y se planea la parte experimental de este trabajo. También se describen los modelos de secado aplicados en este trabajo.

En el capítulo IV se discuten los resultados obtenidos sobre el efecto de la temperatura y velocidad de aire durante el secado de hojuelas de avena. Además, se aplican modelos de secado a los datos experimentales. Se calculan los coeficientes de difusividad efectiva, de transferencia de calor y masa, discutiéndose los resultados. En el capítulo V se concluye sobre los resultados obtenidos, de la velocidad de secado, de los modelos aplicados a los datos experimentales, y del cálculo de los coeficientes de difusividad efectiva, de transferencia de calor y masa. Además, por la experiencia de este trabajo, se proponen recomendaciones de mediciones de variables requeridas para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y masa.

## CAPITULO II ASPECTOS TEORICOS DE SECADO

### 2.1. Definición de Secado.

Bueno e Iglesias (1993) consideran el secado como la eliminación de una fracción líquida que se encuentra presente en una determinada sustancia química o material compuesto; esta fracción líquida puede ser agua, un aditivo o un solvente. De forma general, el secado es la separación de la humedad de los materiales sólidos. Dentro de un material sólido las moléculas de agua se encuentran en equilibrio, pero al proporcionar una descompensación del equilibrio en las condiciones de presión y temperatura de proceso y aportar por conducción-convección una fracción de calor latente de cambio de estado, con la cual la energía de las moléculas de agua será mayor y éstas tenderán a salir, logrando así la separación de la humedad. El calor necesario para lograr la separación se llama calor de vaporización, el cual es la energía necesaria para pasar de la fase líquida a la fase vapor.

El secado de materiales húmedos es un proceso complicado que envuelve simultáneamente los fenómenos de transferencia de masa y de calor acoplados, los cuales ocurren en el interior del material que comienza a secarse.

Existen dos formas de separación de humedad, el secado por contacto directo donde el agente secante (aire caliente) fluye o penetra directamente sobre el sólido proporcionando el calor necesario para generar la evaporación de la humedad, y el secado por contacto indirecto donde el agente secante proporciona de manera indirecta el calor necesario (ya sea por medio de una fuente térmica o a través de una superficie metálica). La transmisión de calor se debe al método de proporcionar el calor necesario y la transferencia de materia se realiza en la expulsión de la humedad.

### 2.1.1. Humedad.

Entendemos por humedad de un sólido al peso de agua que contiene una unidad de peso del sólido seco. Cuando un sólido húmedo es expuesto durante tiempo suficiente a un gas de temperatura y humedad constante, el sólido tenderá a perder o ganar humedad hasta que el equilibrio sea alcanzado entre el gas y el sólido húmedo (la presión de vapor del agua que contiene el sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua que contiene el gas). La humedad alcanzada por el sólido en el equilibrio se denomina humedad de equilibrio del sólido,  $X_e$ , la cual es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de una sustancia al contacto con un gas de humedad y temperatura constantes. Si la humedad del sólido es mayor que la humedad de equilibrio, el sólido se secará hasta alcanzar la humedad de equilibrio; de lo contrario, si la humedad del sólido es menor que la humedad de equilibrio, el sólido adsorberá agua del gas hasta que se alcancen las condiciones de equilibrio.

La diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el gas se denomina humedad libre y es la humedad que puede perder el sólido después de un contacto suficiente con el gas en condiciones dadas y constantes.

La humedad ligada es agua retenida de forma tal que ejerce una presión de vapor inferior a la del agua libre a la misma temperatura. Esta agua puede estar retenida en pequeños capilares adsorbidos sobre la superficie o formando dilución en la pared de las células.

Papadakis y Col. (1993) hacen una clasificación en función de cómo la humedad puede ser retenida en el sólido:

- a) Humedad retenida solo en la superficie externa de la partícula (sólido no poroso y no higroscópico).
- b) Humedad condensada en poros capilares (sólido poroso y no higroscópico).
- c) Humedad físicamente adsorbida por el material sólido (sólido poroso e higroscópico).

- d) Humedad disuelta en el material sólido.
- e) Humedad químicamente enlazada al sólido.

### 2.1.2. Isotermas de sorción

Cuando un sólido es expuesto a un gas húmedo de humedad y temperatura constantes, el sólido tenderá a perder o ganar humedad hasta que el equilibrio sea alcanzado. El contenido de humedad en equilibrio del sólido  $X_e$  es función de la humedad relativa del gas  $\psi$ , a temperatura constante, es llamado isoterma de sorción.

Las isotermas de sorción son esenciales en el secado debido a que  $X_e$  es el límite menor de contenido de humedad que puede ser alcanzado a temperatura y humedad del gas dado. La velocidad de secado es proporcional a la diferencia entre el contenido de humedad actual y el equilibrio ( $X-X_e$ ). En el almacenaje de los productos  $X_e$  corresponde a las condiciones bajo el cual son almacenados, si el valor es más alto que el contenido de humedad del producto final, entonces las condiciones de secado tendrán que ser cambiadas.

### 2.2. Velocidad de secado

En los procesos de secado convectivos donde el medio secante se encuentra en contacto con el aire, las curvas de secado dependen del material y las condiciones de los alrededores: velocidad del aire, temperatura y humedad.

Se define a la velocidad de secado como la pérdida de humedad ( $X$ ) del sólido húmedo en una unidad de tiempo, operando en condiciones constantes de secado. De manera diferencial la velocidad de secado se representa:

$$R_c = \left( -\frac{dX}{dt} \right) \quad (2.1)$$

Para obtener curvas típicas de secado, la bibliografía (Comings, 1983), sugiere colocar la muestra húmeda la cual soporta una corriente de aire a condiciones constantes de secado y a la vez soportada por una balanza que permita obtener a intervalos de tiempo frecuentes el peso de la muestra. Si obtenemos la humedad de agua en el sólido a cada intervalo de tiempo y lo graficamos, se obtiene una curva típica de velocidad de secado, ver figura 2.1

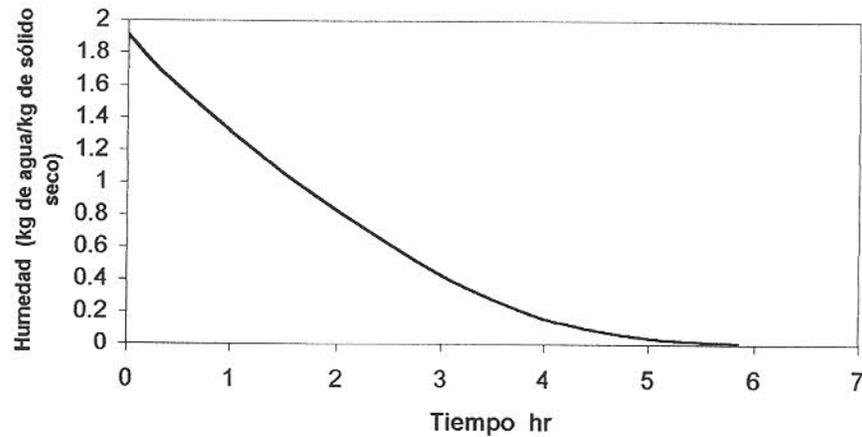


Figura 2.1 Curva típica de secado

Donde se puede observar que al principio la humedad del sólido disminuye casi linealmente con el tiempo de secado. Sin embargo, al obtener las pendientes a las curvas de secado y se grafican contra el tiempo, se obtiene una curva de velocidad de secado (figura 2.2).

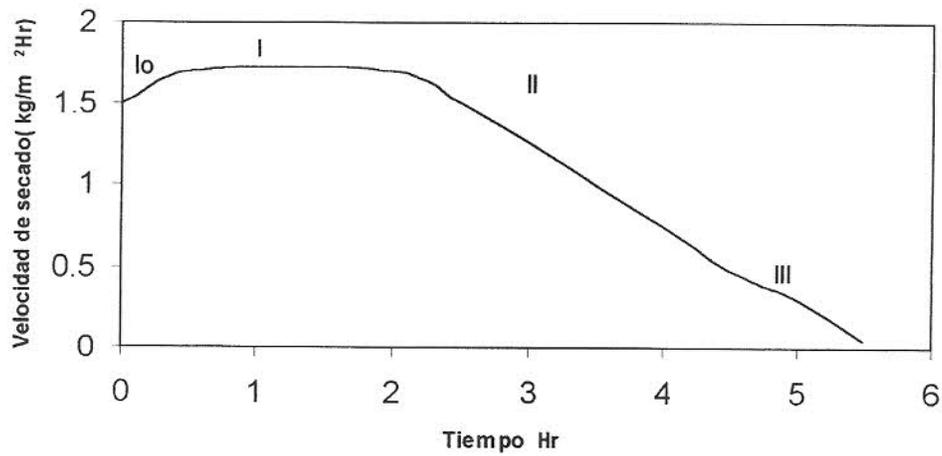


Figura 2.2 Curva de velocidad de secado en función del tiempo.

Otra manera de mostrar las curvas de velocidad de secado es graficarla con respecto al contenido de humedad en el sólido tal y como se muestra en la figura 2.3.

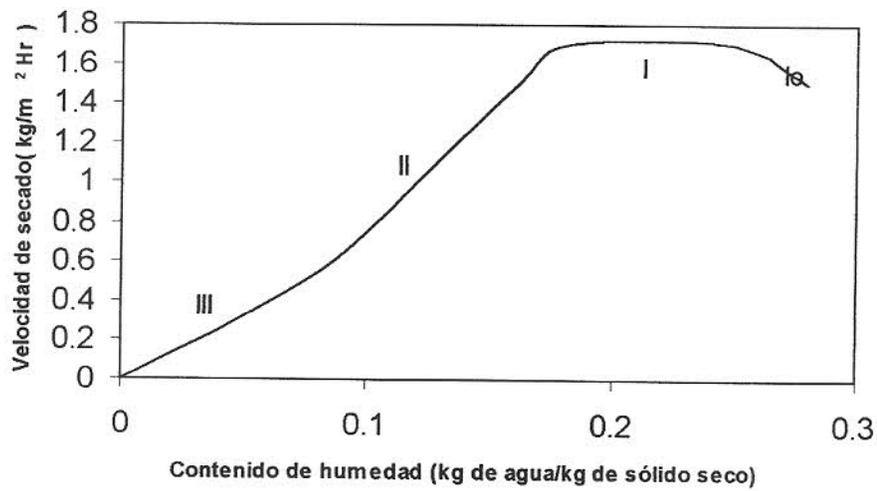


Figura 2.3. Curva de velocidad de secado en función de la humedad.

Las curvas de velocidad de secado consisten de los siguientes periodos:

Periodo I<sub>0</sub>, durante el cual la velocidad de secado aumenta o disminuye rápidamente desde su valor inicial. Su duración es relativamente corta y en algunos experimentos puede o no observarse. Se define como periodo de calentamiento de los sólidos.

El periodo I corresponde al periodo de velocidad constante cuando la velocidad de difusión de la humedad no cambia con el tiempo. Esta condición estacionaria persiste como las fuerzas capilares son suficientemente poderosas para transportar la cantidad requerida de humedad que está siendo evaporada en la superficie.

En el periodo II del proceso muestra el periodo de superficie de secado insaturado. El contenido de humedad promedio ha alcanzado el contenido de humedad crítico y la película de la superficie de humedad ha sido reducida por evaporación, que además el secado causa sitios secos que aparecen sobre la superficie. Esta etapa procede hasta que la película de la superficie es enteramente evaporada.

Durante el periodo III la velocidad de secado es controlada por difusión de humedad del interior a la superficie. Se ha encontrado que la velocidad de secado durante los periodos II y III (llamado periodo de velocidad decreciente) del proceso, son muy cercanos y esto se debe a las fuerzas de unión débiles de las moléculas del producto ( Dietl y Col.,1995).

El proceso de secado puede estar formado por todos los periodos descritos anteriormente o solo por uno o mas de ellos, según las humedades inicial y final. El punto C, donde concluye el periodo de velocidad constante y comienza el periodo de velocidad decreciente se conoce como contenido crítico de humedad (Comings , 1983).

Ratti y Crapiste, 1995, establecen que las curvas de secado definen dos regiones características: el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. En el periodo de velocidad constante la evaporación del agua se lleva en la superficie del sólido, mientras que en el periodo de velocidad decreciente la transferencia de masa toma lugar en el interior del sólido.

El periodo de velocidad constante va desde la humedad inicial  $X_0$  hasta la humedad crítica  $X_c$ . El valor de la humedad crítica depende de las condiciones de aire de secado y del espesor del material a secar, este valor ha de determinarse experimentalmente. El periodo de velocidad decreciente va desde la humedad crítica  $X_c$  hasta la humedad final del sólido, cuyo valor límite es  $X_c$  para estas condiciones dadas.

### **2.3. Cálculo de la velocidad de secado**

En el estudio de las curvas de velocidad de secado se analizan por separado para cada uno de los periodos antes descritos: periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente. A continuación se analiza el primero, desarrollando las principales ecuaciones que rigen en este periodo.

#### **2.3.1 Remoción de humedad en el periodo de velocidad constante.**

El periodo de velocidad constante se alcanza cuando la superficie ha llegado a la temperatura de equilibrio y el vapor de agua puede difundirse dentro de la superficie de una corriente de aire. En los procesos de secado convectivo donde el medio secante está en contacto con el aire, las curvas de secado dependen del material y las condiciones de los alrededores (Comings, 1983).

El calor es transferido del aire hacia el agua y el agua es evaporada hacia la superficie. En el equilibrio la velocidad de calor transferido es igual a la velocidad de transferencia de masa por el calor de vaporización del agua.

$$hA(T_a - T_s) = k_g A(X_s - X_a)\Delta H_v \quad (2.2)$$

El coeficiente de transferencia de masa  $k_g$  ha sido relacionado de acuerdo con el calor húmedo  $C_s$

$$\frac{h}{C_s} = k_g \quad (2.3)$$

donde:

$$C_s = 1.005 + 1.88H_a \quad (2.4)$$

La ecuación 2.3 permite estimar el coeficiente de transferencia de masa  $k_g$  cuando no hay suficiente información. La humedad  $H_a$  se relaciona a la presión parcial del agua ( $P_{H_2O}$ ) en el aire de acuerdo a

$$H_a = \frac{18P_{H_2O}}{29(P_T - P_{H_2O})} \quad (2.5)$$

donde:  $P_T$  es la presión total (620 mm de Hg en Celaya, Gto.), 18 y 29 son pesos moleculares del agua y aire respectivamente.

Durante este periodo la superficie del sólido se considera totalmente cubierta por una capa líquida y la evaporación dependerá de la velocidad de difusión del vapor o la intensidad del paso de calor a través de la capa límite del aire. Se considera despreciable la resistencia a la difusión a través del sólido hasta la superficie, por lo que la velocidad de difusión es igual a la velocidad de secado.

Cuando el secado procede a velocidad constante, la evaporación de la superficie controla la velocidad de secado. Durante el periodo de velocidad constante, la humedad del

interior emigra a la superficie por varios mecanismos y es evaporada. Si el secado ocurre a una temperatura demasiado alta, la superficie forma una capa de celdas selladas. Estas presentan una barrera a la migración a la humedad y tienden a mantener la humedad sellada adentro. Estas condiciones son conocidas como “endurecimiento”. La velocidad de evaporación de la superficie controla la velocidad de secado y es gobernada por la ecuación:

$$R_C = \frac{UA(T_a - T_s)}{\Delta H_v} = k_g A(X_s - X_a) \quad (2.6)$$

El valor del coeficiente global de transmisión de calor U, depende del mecanismo de paso de calor al cuerpo húmedo (Stanley y Charm, 1971). Si el calor se transmite solo por convección del aire a la superficie húmeda:

$$U = h \quad (2.7)$$

Ben y Perre, 1988, establecen que al comienzo del secado, cuando el contenido de agua es suficiente, el medio poroso se aproxima a la temperatura del bulbo húmedo. Cuando el secado es estable, la temperatura es uniforme dentro del medio poroso, el flujo de vapor es despreciable en el corazón del medio y la evaporación solo tiene lugar en la superficie. La velocidad de secado es proporcional al calor proporcionado:

$$R_C = \frac{h}{\Delta H_v} (T_a - T_s) \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 permite una precisa determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor h.

Vaccarezza y Col., 1974 observaron que durante el secado de remolacha de azúcar, la temperatura de la muestra se incrementaba rápidamente hasta aproximarse a la temperatura del bulbo seco; sin embargo, el gradiente de temperatura llega a ser despreciable solo cuando el 90% de la humedad inicial es evaporada. Observaron que al graficar  $\log \Delta T$  contra tiempo se obtuvo una línea recta cuya pendiente era la misma

que al graficar  $\log \left( \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \right)$  contra tiempo, haciendo esta analogía como una consecuencia del balance de masa y calor el cual puede ser escrito (despreciando el calor sensible en comparación con el calor latente de evaporación) como sigue:

$$\Delta H_v \left( -\frac{d\bar{X}}{dt} \right) m = hA\Delta T \quad (2.9)$$

donde:

$$\bar{X} = \left( \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \right) \quad (2.10)$$

$\Delta T$  = gradiente de temperatura entre la temperatura de bulbo seco y la temperatura de la muestra.

Conociendo la temperatura de la muestra y sustituyendo en la ecuación 2.9 podemos conocer el valor de h.

Las correlaciones disponibles para los coeficientes de transferencia de calor bajo convección forzada están generalmente representados por los números adimensionales de Nusselt (Nu), Reynolds (Re) y Prandtl (Pr).

$$Nu = c Re^n Pr^b \quad (2.11)$$

Esta práctica se justifica por el hecho de que los coeficientes teóricamente dependen del tipo de flujo (laminar o turbulento), de la geometría del cuerpo sólido, de las propiedades físicas del fluido, de la temperatura promedio y de la posición a lo largo de la superficie del cuerpo. También depende de si el mecanismo de transferencia de calor es por convección natural o por convección forzada. La validez de estas ecuaciones aplicadas a secado no ha sido totalmente establecida (Ratti y Crapiste, 1994).

Dependiendo de las condiciones de trabajo en la mezcla aire-agua, el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  se calcula por las expresiones siguientes (Ocon y Tojo, 1970; Necati, 1980):

Para fluidos ordinarios en flujo laminar

$$Nu_x = \frac{hl}{k} = 0.332 Re_x^{0.5} Pr^{0.33} \quad Re_x < 5 \times 10^5 \quad (2.12)$$

Esta correlación es válida para un rango de  $0.6 < Pr < 10$

Para valores grandes de número de Prandtl

$$Nu_x = \frac{hl}{k} = 0.339 Re_x^{0.5} Pr^{0.33} \quad Re_x < 5 \times 10^5 \quad (2.13)$$

Para la aplicación de las ecuaciones anteriores se recomienda que las propiedades del fluido sean evaluadas a la media aritmética de la temperatura de la pared  $T_s$  y la temperatura de flujo externo  $T_a$ , la cual se llama temperatura de película. Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor promedio  $h_m$  sobre la longitud de la placa el número de Nusselt promedio esta dado por :

$$Nu_m = \frac{hl}{k} = 0.664 Re_l^{0.5} Pr^{0.33} \quad 0.6 < Pr < 10 \quad (2.14)$$

$$Nu_m = \frac{hl}{k} = 0.678 Re_l^{0.5} Pr^{0.33} \quad Pr \rightarrow \infty \quad (2.15)$$

donde :

$$Nu_m = \frac{h_m l}{k} \quad (2.16)$$

$$Re_m = \frac{l v \rho}{\mu} \quad (2.17)$$

Para fluidos ordinarios en flujo turbulento

$$Nu_x = 0.029 Re_x^{0.8} Pr^{0.43} \quad Re_x > 2 \times 10^5 \text{ a } 5 \times 10^5 \quad (2.18)$$

Todas las propiedades son evaluadas a la temperatura de película.

El número de Nusselt promedio para flujo turbulento

$$Nu_m = 0.036 Pr^{0.43} (Re_L^{0.8} - 9200) \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.25} \quad (2.19)$$

Todas las propiedades son evaluadas a la temperatura de la corriente libre excepto  $\mu_w$ , la cual es evaluada a la temperatura de la pared.

Geankoplis (1995) considera que por la forma del borde de entrada de la superficie de secado se causa turbulencia, y es posible usar las siguientes expresiones en un rango de temperatura del aire entre 45-150 °C

Para flujo de aire paralelo a la superficie

$$h = 0.0175 G^{0.8} \quad (2.20)$$

donde  $G = v \rho$  toma valores de 2500 y 30 000 kg/hr m<sup>2</sup>

Para flujo de aire perpendicular a la superficie

$$h = 0.37 G^{0.37} \quad (2.21)$$

donde  $G$  toma valores comprendidos entre 4000 y 20 000 kg/hr m<sup>2</sup>. Estas expresiones son útiles para estimar la velocidad de secado durante el periodo de velocidad constante.

Las correlaciones para calcular el coeficiente de transferencia de masa  $k_g$  sobre una placa plana en función de los números adimensionales son:

Para flujo laminar:

$$Sh_x = 0.332 Sc^{0.333} Re_x^{0.5} \quad Re_x < 5 \times 10^5 \quad (2.22)$$

Para flujo turbulento:

$$\frac{k_g}{\mu_\infty} Sc^{0.66} = 0.0296 Re_x^{-0.2} \quad 5 \times 10^5 < Re_x < 10^7 \quad (2.23)$$

Cuando la transferencia de calor y masa ocurren simultáneamente, los coeficientes de transferencia de calor y masa  $h_m/k_g$  se pueden relacionar por la expresión :

$$\frac{h_m}{k_g} = Cp \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (2.24)$$

donde:

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (2.25)$$

por lo tanto se obtiene :

$$\frac{h_m}{k_g} = Cp \left( \frac{\alpha}{D_{AB}} \right)^{2/3} \quad (2.26)$$

$$Sh = \frac{k_g L}{D_{AB}} \quad (2.27)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (2.28)$$

Todas las propiedades son evaluadas a la temperatura de película.

### 2.3.2. Efectos de las variables sobre la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante

Si se desprecia el efecto de radiación y conducción a través del sólido, la velocidad de secado es proporcional a  $h$  y a la velocidad del aire,  $G^{0.8}$ , para flujo paralelo; y a la superficie del aire y  $G^{0.37}$ , para flujo perpendicular a la superficie.

Al aumentar la temperatura del aire, aumenta el gradiente de temperatura entre la temperatura del aire y la temperatura de superficie y la velocidad de secado también

aumenta. Si aumenta la humedad del aire, el gradiente entre la humedad de la superficie y la humedad del aire disminuye y la velocidad de secado también disminuye.

Al aumentar el espesor del material disminuye el área de contacto por unidad de volumen y la velocidad de secado disminuye. Considerando estos efectos, se puede decir que los factores que controlan la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante son:

1. Área de superficie de secado.
2. La diferencia en temperatura y humedad entre el aire y la superficie de secado.
3. Los coeficientes de transferencia de masa y calor.

### **2.3.3. Remoción de humedad en el periodo de velocidad decreciente.**

El periodo de velocidad constante termina cuando la velocidad de migración del agua del interior a la superficie llega a ser menor que la velocidad de evaporación en la superficie. Como ya se mencionó, el periodo de velocidad decreciente inicia en el punto de humedad crítica  $X_c$  (punto donde termina el periodo de velocidad constante y la velocidad de secado es regida por la evaporación del agua sobre la superficie húmeda). Se compone de dos periodos, uno en el que la velocidad de secado varía linealmente con la humedad desde el punto crítico y otro que no cumple con esta variación lineal.

En el primer periodo de velocidad decreciente, la superficie se seca y la velocidad de secado disminuye, al continuar el periodo, la evaporación se desplaza hacia la parte interna del material y la velocidad de secado disminuye aún más. Por lo que en los periodos de velocidad decreciente la velocidad de secado esta influenciada por el movimiento de la humedad dentro del sólido y ya no influyen los efectos externos como es la velocidad del aire, sobre todo en la última etapa (Kisakurek y Gebizlioglu, 1978).

En este periodo el transporte de humedad del interior del sólido hacia la superficie puede realizarse por diversos mecanismos que pueden ocurrir simultáneamente y/o variar

durante el proceso de secado. Los principales mecanismos del movimiento de humedad en el interior del material pueden existir a consecuencia de las fuerzas capilares, difusión del líquido, como resultado de los gradientes de concentración, difusión de vapor debido a los gradientes de presión parcial y difusión en las capas líquidas absorbidas a las interfaces del sólido.

En este periodo el contenido disminuye notablemente en la superficie del medio, el cual llega a ser higroscópico. La presión de vapor en la interfase disminuye y la velocidad de secado disminuye. El gradiente de vapor genera difusión gaseosa hacia la superficie y evaporación en el medio poroso. La evaporación se prolonga hacia la superficie de la placa, zona en la cual el gradiente de contenido de humedad es muy alto.

Kisakurek y Gebizlioglu (1978) consideran que los sólidos se dividen: zona húmeda que se encuentra en el interior y ejerce muy poca resistencia a la transferencia de humedad y zona seca separada por una interfase donde tiene lugar la evaporación. Supone que el movimiento de la humedad en la zona seca tiene lugar por difusión líquida y en la zona húmeda el movimiento de la humedad es por acción de capilaridad.

### **2.3.3.1. Transporte de humedad causado por difusión líquida.**

La difusión de humedad líquida se verifica cuando existe una diferencia de concentración entre el interior del sólido y la superficie. Se presenta en sólidos no porosos donde se forman soluciones de una sola fase con la humedad, como en una pasta, en un jabón o una sustancia gomosa; también en las últimas porciones de humedad en arcillas, madera, harina, cuero, papel, almidón y textiles, y en muchos materiales alimenticios durante el periodo de velocidad decreciente. La difusividad de la humedad  $D_{AB}$  casi siempre disminuye al reducirse el contenido de ésta, por lo que las difusividades suelen ser promedios en el intervalo de las concentraciones considerado (Geankoplis, 1995).

Si el mecanismo de transporte se realiza por difusión líquida y comienza en el punto crítico  $X=X_c$ , en una placa plana por la solución de la ecuación de Fick's, la velocidad de secado se calcula por:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4r^2} (X - X_e) \quad (2.29)$$

En la ecuación 2.29 se muestra que cuando la difusión es un factor controlante, la velocidad de secado es inversamente proporcional al cuadrado del espesor.

### 2.3.3.2. El transporte de humedad causado por acción capilar.

En el secado de sólidos granulares y porosos, la humedad libre o sin combinar se desplaza a través de capilares y espacios vacíos de los sólidos por acción capilar y no por difusión. Kisakurek y Gebizlioglu, (1978) establecen que la teoría de capilaridad supone que el flujo de humedad líquida a través de capilares se causa por la atracción molecular sólido-líquido, se basa en que los sólidos porosos tienen un gran número de capilares de todos tamaño y en todas direcciones, los cuales están interconectados. A medida que se evapora el agua, se forma un menisco del líquido en cara poro. Esto origina fuerzas capilares por la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas constituyen el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie. Los poros pequeños desarrollan fuerzas mayores que los poros grandes. Esta teoría supone que el líquido se mueve a la superficie sólo por acción de capilaridad, la evaporación tiene lugar en la superficie, solo existe una fase líquida con un sólo componente y el radio de capilaridad mínimo es cero.

Una ecuación aproximada que se utiliza en el caso de materiales en donde el movimiento de la humedad se controla por medio del flujo capilar es:

$$t = \frac{\rho r \Delta H_v (X_c - X_e)}{h (T - T_a)} \ln \frac{X_c - X_e}{X - X_e} \quad (2.30)$$

Para sólidos muy porosos como arena, donde los poros son muy grandes, la curva de velocidad de secado en el periodo de velocidad decreciente suele ser recta y, por lo tanto, las ecuaciones de difusión no son aplicables.

#### 2.3.4. Cálculo de la difusividad en el periodo de velocidad decreciente.

Se supone que en el periodo de velocidad decreciente la transferencia de masa es controlada por difusión, donde el transporte de humedad o vapor es regido por la segunda ley de difusión de Fick's:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (2.31)$$

$X$  es la humedad del sólido,  $t$  es el tiempo de difusión,  $x$  es la distancia en la dirección de la difusión y  $D_{eff}$  es la difusividad efectiva.

Para aplicar la segunda ley de Fick's, el flujo sobre el material debe ser unidimensional, se supone que la superficie está seca o tiene un contenido de humedad de equilibrio y la distribución de humedad es uniforme. La solución de la segunda ley de Fick's en una dirección para una placa plana es:

$$\frac{X - X_e}{X_c - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-(2n+1)^2 D_{eff} t / (2r)^2} \quad (2.32)$$

En la ecuación anterior se supone que  $D_{eff}$  es constante; sin embargo,  $D_{eff}$  es constante en raras ocasiones, ya que varía con el contenido de humedad y temperatura. Para tiempos de secado largos, la ecuación se simplifica en una expresión límite de la ecuación de difusión:

$$\frac{X - X_e}{X_c - X_e} = \frac{8}{\pi^2} (e^{-D_{eff}t(\pi/2r)^2}) \quad (2.33)$$

La difusividad efectiva  $D_{eff}$  calculada de la segunda ley de Fick's es un promedio, el cual depende del movimiento de las moléculas de agua dentro de las diferentes estructuras en el interior del sólido.

Geankoplis (1995) propone el siguiente método para calcular la  $D_{eff}$

$$D_{eff} = \left(\frac{D_{eff}t}{x^2}\right) \frac{x^2}{t} \quad (2.34)$$

donde el término  $\frac{D_{eff}t}{x^2}$  se calcula a partir de la ecuación 2.33, se grafica  $\log(X/X_c)$  contra

$\frac{D_{eff}t}{x^2}$ , obteniéndose una línea recta. A partir de datos reales se encuentra el valor teórico

de  $\frac{D_{eff}t}{x^2}$ , conociendo el espesor de la placa ( $x$ ) y el tiempo  $t$ , se conoce la  $D_{eff}$  con la

ecuación 2.34.

Karathanos y Col.,1990, aplican el método de pendientes para estimar la difusividad efectiva a datos de secado de materiales alimenticios. Este método se puede aplicar a muestras de varios contenidos de humedad. El método se basa en la solución de la segunda ley de Fick's en una dirección para una placa plana (ecuación 2.28). Haciendo

$W = \frac{X - X_e}{X_o - X_e}$  y  $Fo = \frac{D_{eff}t}{r^2}$  número de Fourier para difusión. Se obtienen las curvas

experimentales de  $\log(W)$  contra  $t$  y es comparada con la curva de difusión teórica  $W$

contra  $F_0$ . Se obtienen las pendientes de las curvas de secado experimental  $(dW/dt)_{exp}$ , y las pendientes de la curva teórica  $(dW/dF_0)$  son estimadas a una relación de humedad por diferenciación numérica. La difusividad efectiva se calcula por la ecuación:

$$D_{eff} = \left( \frac{\left( \frac{dW}{dt} \right)_{exp}}{\left( \frac{dW}{dF_0} \right)_{th}} \right) r^2 \quad (2.35)$$

$r$  es el espesor medio de placa (si el secado es por ambos lados) o espesor de la placa (si el secado es de un lado). Este método proporciona información cuantitativa del transporte de masa de agua y el tipo de difusión de humedad (líquido o vapor).

#### 2.4. Proceso de elaboración de las hojuelas de avena

Desrosier (1983) establece que en la producción de cereales, la avena ocupa el cuarto lugar en producción después del trigo, arroz y maíz. Las variedades más importantes de avena se dividen en avena roja (avena byzantina) y avena blanca (avena sativa), siendo esta última la de mayor aplicación por su mayor contenido de proteínas y menor proporción de grasa que la avena roja.

El proceso de molienda de avena comprende las siguientes etapas:

1. Limpieza, donde se eliminan los materiales indeseables como paja, hiervas y otros granos y avena no adecuada para la molienda.
2. Durante el secado de los granos se consigue reducir el contenido de humedad hasta una cantidad tal que permita su fácil conservación, facilitar el descortezado y desarrollar un sabor característico a tostado; además, tiene por objeto reducir la actividad lipolítica. Las condiciones óptimas para la aparición de dicho sabor tiene lugar cuando el grano se seca suavemente hasta un 8% de humedad sin que la temperatura pase de 80°C, seguido de un proceso de tueste durante 20 minutos en corriente de aire a 149°C durante el cual se reduce la humedad hasta 5%.

3. Descascarado. La avena se enfría y se pasa a una máquina para impactar el grano contra un revestimiento de hule, eliminando la cáscara con corrientes de aire.
4. Graduación del grano según su longitud.
5. Corte, donde se convierte el grano en dos o cuatro piezas uniformes.
6. Formación de hojuelas, la avena cortada se trata con vapor (utilización de vapor real a presión atmosférica) antes de laminar. El tratamiento con vapor flexiona a los granos de modo que se rompan menos durante la operación de laminado; ayuda a desnaturalizar las enzimas que producen enranciamiento. Después de la laminación se enfrían con aire las hojuelas, ayudando a eliminar cualquier cáscara producida durante las operaciones de corte. Luego se envasa en paquetes de tipo respirable.

#### Composición de avenas.

La avena contiene mayor proporción de proteínas que cualquiera de los otros cereales. También se han obtenido buenos rendimientos de buena calidad. Una composición aproximada de la avena laminada se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición de las hojuelas de avena

Calorías (por 100g)	385
Humedad	8.1 %
Proteínas(N x 6.25)	16.7 %
Grasa	6.9%
Fibra cruda	1.5%
Cenizas	1.8 %
Carbohidratos	65 %

## 2.5. Proceso de secado en los alimentos

El proceso de secado en los alimentos es mucho más complejo y heterogéneo que otros sistemas. Entre los componentes de los alimentos se encuentran proteínas, grasas, carbohidratos, vitaminas, enzimas y sales inorgánicas y muchos otros componentes que están fuertemente hidratados. El agua presente en los alimentos no se encuentra en estado puro, puede estar en forma de solución de sólidos, de gel, en emulsión o ligada de diversas maneras a los sólidos. (Brennan y Butters, 1980).

El agua líquida que fluye hacia la superficie durante el secado contiene diversos productos disueltos. El movimiento de algunos compuestos solubles resulta impedido por las paredes celulares que actúan como membranas semipermeables.

La densidad y porosidad son propiedades físicas importantes que caracterizan la textura, calidad del secado y humedad de alimentos, sus valores experimentales son esenciales en el modelado y diseño de varias operaciones de transferencia de masa y calor como: secado, calefacción y enfriamiento de alimentos. La porosidad es propiedad importante en la predicción de parámetros difusionales de alimentos celulares durante el secado. La densidad de los alimentos en polvo es afectada por la actividad del agua del sistema, lo cual se relaciona con el contenido de humedad de alimentos a través de isoterms de adsorción.

La porosidad de la partícula afecta las propiedades de transporte de masa y calor, la difusividad de la humedad efectiva (propiedad de transporte de agua en el material) puede ser estimada aplicando la ecuación de difusión a los datos de secado (Marcusis y Saravacos, 1990).

Chen y Col., (1984), establecen que la distribución del agua dentro del material se presenta en dos formas: agua retenida en estructuras capilares, resultado de las fuerzas de tensión superficial y agua que interacciona con los componentes de moléculas de los alimentos a través de enlace de hidrógeno o alguna forma dipolar. La capacidad de enlace de agua depende de las propiedades fisico-químicas, de la composición de los materiales que se prueban y de las condiciones experimentales usadas. El término de capacidad de enlace de agua se refiere a la habilidad del alimento o de sus componentes de retener agua bajo ciertas condiciones.

Los factores que podrían contribuir a una mayor capacidad de enlace de agua de frutas fibrosas se deben a la baja tensión superficial y diámetro mayor de capilaridad, lo cual reduce la presión de succión.

Según Ratti (1995) uno de los fenómenos que ocurren durante el secado de alimentos es la contracción. La contracción de los productos alimenticios es no homogénea, la mayoría de la contracción ocurre en las primeras etapas de secado, donde ocurre el 40-50% de la contracción total.

La contracción durante el secado puede cambiar con la resistencia a la transferencia de humedad en la muestra. A bajas velocidades de aire, la resistencia superficial prevalece, los perfiles de humedad en la muestra son relativamente planos y los esfuerzos internos son mínimos por lo que los alimentos se contraen uniformemente. A altas velocidades de aire, la resistencia interna controla la velocidad de transferencia, particularmente a bajo contenido de agua. La superficie llega a ser más seca que en el centro; sin embargo, la contracción es desigual a diferentes puntos. Si las velocidades son muy altas, el muy bajo contenido de agua en la superficie en las primeras etapas de secado, hace a la superficie rígida limitando la contracción. A bajas velocidades de aire la superficie no se entibia (no sufre rigidez) hasta que el contenido de agua ha alcanzado muy bajos valores. Los

pequeños efectos de temperatura observados sobre la contracción en práctica pueden ser atribuidos a la dependencia de la temperatura de las propiedades elásticas y mecánicas.

La contracción de productos agrícolas durante el secado es un fenómeno físico observable el cual ocurre simultáneamente con la difusión de la humedad, y puede tener un efecto significativo sobre la difusividad de masa y la velocidad de remoción de humedad (Simal y Col., 1994).

La interacción entre el agua y los componentes de los alimentos puede ser débil o fuerte dependiendo de las propiedades físico-químicas de los componentes de las fibras. Las fracciones de enlace menores de agua podrían emigrar a otros ingredientes de los alimentos debido a la diferencia de actividad del agua.

## CAPITULO III EQUIPO Y MODELOS DE SECADO.

En este capítulo se describen los equipos utilizados para la realización de este trabajo: 1) Secador de Túnel con Charolas y 2) Termoanalizador Modelo STA-780. Además, se hace una descripción de los principales modelos en la Operación de Secado.

### 3.1. Métodos generales de secado.

Los procesos de secado se pueden clasificar: por lotes cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica en un periodo de tiempo; o continuos donde el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene el material seco con régimen continuo.

Los equipos para el secado se clasifican en base a la transmisión o transferencia de calor en: secadores directos donde la transferencia de calor se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con los gases calientes. Los secadores directos se llaman también secadores por convección. Secadores indirectos, donde el calor se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material mojado y la superficie caliente. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

### 3.2. Secador de túnel con charolas.

El secador empleado en este trabajo es del tipo de secadores de túnel con charolas, correspondiente a los secadores directos por convección. El equipo consta de las siguientes partes:

1. Psicrómetro

2. Base para psicrómetro
3. Interruptor para el regulador de temperatura
4. Regulador de Temperatura
5. Interruptor para el regulador de velocidad de aire
6. Regulador de velocidad de aire
7. Ventilador
8. Fuente de calor (resistencias eléctricas).
9. Toma de temperatura antes de la muestra
10. Balanza digital
11. Anemómetro
12. Ventana para entrada y salida de muestra.
13. Cuatro charolas para colocar la muestra (18.5 cm de ancho x 27.5 cm de largo x 1.4 cm de espesor).
14. Portacharolas.

A este secador se le realizó una adaptación de un equipo de adquisición de datos de 48 puertos tipo Cole Parmer. Utilizándose 6 puertos, para los cuales se utilizaron 5 sensores termopares y una celda de carga. La celda de carga tiene una capacidad de peso de 10 libras (4540 gramos). Cuatro de los termopares son del tipo T, calibre 24 con aislamiento de teflón y uno del tipo T, calibre fino. Con estos sensores se midieron las temperaturas del aire a la entrada y salida del secador, la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura ambiente. Con esta adaptación al secador no se utilizó ni la balanza digital del secador y ni el psicrómetro. Para la medición de la temperatura del bulbo húmedo, se le adaptó una tela alrededor del termopar y una botella con dosificador de agua que mantenía húmeda la tela que cubría al termopar (en el apéndice A se presentan las características del secado de túnel con charolas).

### **3.2.1. Preparación de las muestras para el secador de túnel con charolas.**

Uno de los principales factores que se pueden controlar y que determinan el inicio de las curvas de secado, es la humedad inicial en la muestra. Las hojuelas de avena que se utilizaron fueron de la marca Granvita envasadas en bolsas de plástico y se le determinó la humedad que contenían, encontrándose entre el intervalo de 6-8 %.

Para controlar la humedad inicial de las muestras a analizar se realizó lo siguiente:

- Primeramente, se colocaron las hojuelas de avena a secar en una estufa de vacío a la temperatura de 96 °C y 25 mm de Hg, por 24 horas, según la norma “Determinación de humedad a granos de avena”, por AOAC Official Methods of Analysis (1990).
- Después se sacaron de la estufa de vacío y se colocaron en un desecador para llevar la muestra a temperatura ambiente.
- Una vez alcanzada la temperatura ambiente se colocaron 12 gramos de hojuelas de avena a 10 vasos de precipitado, de los cuales 5 vasos de precipitado se ocuparon para la determinación de agua retenida a 24 horas, y los otros 5 vasos se ocuparon para la determinación de agua retenida a 48 horas.
- A los vasos de precipitado se les agrego agua como se indica en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Determinación de la cantidad de agua retenida.

No. de vaso	gramos de avena	gramos de agua
1 y 6	12	6
2 y 7	12	12
3 y 8	12	18
4 y 9	12	24
5 y 10	12	30

- A las 24 horas se observó que en los vasos 1 y 2 había hojuelas completamente secas, lo cual quiere decir que no se humedecieron todas las hojuelas de los vasos; para el vaso No. 3 se humedecieron todas las hojuelas, pero no hubo exceso de agua; para el vaso No. 4 había presencia de agua en exceso, la cual se escurrió y pesó 6 gramos de agua, lo que quiere decir que adsorbió 18 gramos de agua; para el vaso No. 5 había presencia de agua en exceso, la cual se escurrió y pesó 10.5 gramos de agua, lo que quiere decir que adsorbió 19.5 gramos de agua.

- A las 48 horas se observó igual en los vasos 6, 7 y 8 que a 24 horas los vasos 1, 2 y 3; en el vaso No. 9 había presencia de agua en exceso, la cual se escurrió y pesó 6.5 gramos de agua, lo que quiere decir que adsorbió 17.5 gramos de agua; en el vaso No. 10 había presencia de agua en exceso, la cual se escurrió y pesó 11.5 gramos de agua, lo que quiere decir que adsorbió 18.5 gramos de agua.

Con este análisis se concluyó que las hojuelas de avena adsorben entre 150-165 % de agua. Con esto se optó por agregar una cantidad de 180 % de agua a las muestras para las pruebas a realizar.

Considerando las limitaciones del equipo y tomando en cuenta cubrir el área de las cuatro charolas con muestra y considerando 180% de agua, las pruebas se realizaron como sigue:

1. Colocar las hojuelas de avena a secar en la estufa de vacío a 96 °C y 25 mm de Hg por 24 horas.
2. Colocarlas en el desecador por una hora para que alcancen la temperatura ambiente.
3. Pesar 600 gramos de hojuelas de avena.
4. Agregar 1080 gramos de agua.
5. Dejarlas en reposo por un tiempo de 8 horas.
6. Preparar el secador de túnel de charolas a las condiciones del experimento y el equipo de captura de datos.
7. Distribuir la muestra en las cuatro charolas y colocarlas en el portacharolas del secador
8. Cerrar la ventana del secador e inicial el equipo de captura de datos.
9. Observar la temperatura de entrada y controlarla, a  $\pm 1$  °C.
10. Cuando el peso ya no varíe, parar el equipo.

### **3.2.2. Diseño de experimentos para el secador de túnel con charolas.**

Los principales factores que afectan el secado de sólidos son: temperatura, velocidad de aire, tamaño del sólido y contenido de humedad. En este trabajo como ya se mencionó, el contenido de humedad inicial en las hojuelas fue controlado y

constante, de 1.8 de humedad en base seca para todas las pruebas. El tamaño de las hojuelas de avena no se puede variar ya que la mayoría de las hojuelas de avena presentan casi el mismo tamaño de 1 cm. de largo por 0.6 cm. de ancho con espesor de 0.1 cm.

Para realizar el diseño de experimentos, se manipularon los controles de temperatura y velocidad de aire del secador de túnel para conocer los límites inferiores y superiores de operación. Se colocó el control de temperatura al máximo y, encendiéndose también una resistencia adicional, mientras que el control de velocidad de aire empezó en la posición 2 (de 10 posiciones), obteniendo una velocidad de aire de 1.05 m/s y 115 °C; para la posición 3 la velocidad de aire fue de 1.19 m/s y la temperatura de 112 °C; y así sucesivamente hasta la máxima velocidad de aire y la máxima temperatura obteniéndose la temperatura máxima alcanzada en el secador de 90 °C, para una velocidad de aire de 2 m/s.

Considerando estas condiciones del equipo, el diseño de experimentos consistió de 2 factores: temperatura y velocidad del aire. El factor temperatura con 4 niveles: 45, 60, 75 y 90 °C, y el factor de velocidad de aire con 2 niveles: 1.0 y 1.6 m/s. Los experimentos que se realizaron se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Diseño de experimentos para el secado de túnel con charolas

45 °C	1.6 m/s	45 °C	1.0 m/s
60 °C	1.6 m/s	60 °C	1.0 m/s
75 °C	1.6 m/s	75 °C	1.0 m/s
90 °C	1.6 m/s	90 °C	1.0 m/s

Los experimentos se realizaron de manera aleatoria. Se realizó una réplica del diseño de experimentos.

### 3.3. Análisis Térmico

Los métodos de análisis térmico son un conjunto de técnicas que se basan en la relación “sustancia/temperatura”; o sea en cambios físicos y químicos que tienen lugar en una sustancia en función de la temperatura, estando la temperatura sujeta a un programa de control.

En la tabla 3.3 se muestra una clasificación de algunas técnicas que comprende el Análisis Térmico.

Tabla 3.3 Clasificación de técnicas de análisis térmico.

Propiedad Física	Técnica	Abreviación
Masa	Termogravimetría	TG
	Termogravimetría Derivada	DTG
	Detección de gases desprendidos	EGD
Temperatura	Análisis Térmico Diferencial	DTA
Entalpía	Calorimetría Diferencial de Barrido	DSC
Características Mecánicas	Análisis Termomecánico	TMA
Características Acústicas	Termoacusticometría	
Características ópticas	Termooptometría	
Características Eléctricas	Termoelectrometría	

Como conceptos básicos de las técnicas empleadas en el presente trabajo:

A) **Termogravimetría.** Es una técnica instrumental por medio de la cual una muestra sometida a análisis es pesada continuamente cuando es calentada a una velocidad constante de temperatura que sube con el tiempo. Cuando una sustancia es calentada a varias temperaturas soportando una serie de transformaciones, algunas de las cuales son acompañadas por cambios en la

masa; por consiguiente, la variación de la masa es función de la temperatura  $m=f(T)$ . Un instrumento de gran utilidad es una termobalanza con un graficador simultáneo integrado que registra las variaciones de la masa producidas, como una función de la temperatura de la muestra, proporcionando datos exactos.

**B) Análisis Termogravimétrico Derivado (DTG).** Este análisis determina la primera derivada de la curva termogravimétrica con respecto a la temperatura o al tiempo. Demostrándose que la curva TG registrada en coordenadas T contra variación de masa m, y, la curva diferencial de la variación de la masa es una expresión gráfica de la derivada de la temperatura, siendo su función  $f(t)=dm/dT$ . Por lo tanto, la curva DTG proporciona el punto exacto en donde termina la etapa con la proyección donde la derivada es cero.

### 3.3.1. Analizador Térmico Stanton Redcroft STA 780.

El Analizador Térmico Stanton Redcroft STA 780 es diseñado para dar un registro simultáneo de la curva de termogravimetría TG (peso contra tiempo o temperatura), y el análisis térmico diferencial DTA curva ( $\Delta T-T$ ,  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura de la muestra y el material inerte). El diseño es ingeniado cuidadosamente para dar los mejores resultados posibles de TG y DTA. La unidad simultánea elimina problemas de correlación para la misma sustancia. Los instrumentos por separados para TG y DTA no necesariamente operan bajo condiciones idénticas y algunas veces se dificultan las comparaciones.

La facilidad simultánea del equipo puede colocar a corridas de grandes muestras solo para TG. La capacidad total de la balanza es de 5 g y 3.5 g son usados en el brazo y crisol para TG. Cuenta con un sistema de copa de cerámica interior y el tubo de cerámica del brazo exterior rodea la cabeza de la muestra permitiendo, un control muy preciso de la atmósfera.

El horno es enfriado con agua, esto permite un rápido calentamiento y un rápido enfriamiento. El sistema de balanza se basa sobre una microbalanza electrónica de 5 gramos, la cual es simple y fácil de operar. La unidad control de balanza se basa

sobre un sistema microprocesador y hace posible consideraciones versátiles para ser introducido sobre un registro de peso.

El instrumento es compacto y fácilmente se acomoda sobre una barra alta. Se obtienen mejores resultados cuando se encuentra montada sobre una base anti-vibratoria. El STA-780 opera con un abastecimiento eléctrico de 200-250 volts, 50 Hz, 13 A. de potencia requerida (corriente alterna disponible 110-130 Volts -60 HZ).

### **3.3.2. Preparación de la muestra para analizar en el Termoanalizador.**

Para las pruebas a realizar en este equipo, la muestra consistió de una sola hojuela de avena. Las hojuelas se secaron en una estufa de vacío a 96°C y 25 mm de Hg por 24 horas. Posteriormente se colocaron en el desecador para alcanzar la temperatura ambiente.

Se controló el peso de las hojuelas de avena de la forma siguiente: se pesaron al azar 40 hojuelas de avena y se obtuvo la media aritmética, resultando un peso medio de 28.43 mg. Con base a este resultado se seleccionaron hojuelas de peso de  $28.43 \pm 0.2$  mg.

Una vez seleccionadas las hojuelas, 4 horas antes de cada experimento, se colocaban en un vaso de precipitado con suficiente agua; de tal manera que durante este tiempo la hojuela adsorbía agua. Se encendía el equipo (ver apéndice B), y se estabilizaba a las condiciones de temperatura y flujo de aire a trabajar y se iniciaba el experimento.

### **3.3.3. Diseño de experimentos en el Termoanalizador.**

De igual manera que en el secador de túnel con charolas los factores para el diseño de experimentos fueron: temperatura y velocidad de aire. El factor temperatura con 4 niveles: 45, 60, 75 y 90 °C, y la velocidad de aire de 0.34 y 0.78 m/s. Los experimentos a realizar se muestran en la tabla 3.4:

Tabla 3.4. Diseño de experimentos en el Termoanalizador

45 °C	0.34 m/s	45 °C	0.78 m/s
60 °C	0.34 m/s	60 °C	0.78 m/s
75 °C	0.34 m/s	75 °C	0.78 m/s
90 °C	0.34 m/s	90 °C	0.78 m/s

Se realizó una réplica de los experimentos para poder calcular el error experimental.

### 3.4. Modelos de Secado.

Los datos que se obtienen de una operación de secado por lo general son como humedad en base seca a diferentes tiempos, los cuales se pueden convertir a velocidad de secado. A los datos obtenidos se les puede aplicar algún tipo de modelo en función del tiempo.

Para el modelado de secado de granos, se supone que el movimiento de humedad es limitado a un mecanismo sobre el rango de secado. Chávez-Méndez y Col., 1995; Coonce y Col., 1993., han aplicado la segunda Ley de Fick's de difusión en forma unidimensional para describir la velocidad de secado de granos.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial X}{\partial x} \right) \quad (3.1)$$

Otro modelo de secado de granos ha sido desarrollado con la suposición de que a temperaturas del aire y humedad relativa constantes, la velocidad de pérdida de humedad de un grano es proporcional a la diferencia entre la humedad del grano promedio y el contenido de humedad en equilibrio del grano

$$\frac{dM_{pro}}{dt} = -K(M_{pro} - M_e) \quad (3.2)$$

Con una constante K, la solución de la ecuación es

$$M_{pro} = (M_o - M_e)e^{-kt} + M_e \quad (3.3)$$

Tolaba y Viollaz (1988) usaron la siguiente ecuación para simplificar la velocidad de secado durante el secado de maíz

$$\frac{dM_{pro}}{dt} = G_1 e^{-k_1 t} + G_2 e^{-k_2 t} \quad (3.4)$$

donde:  $G_1$  y  $G_2$  son constantes de secado y  $k_1$  y  $k_2$ , parámetros de ajuste, y obtuvo muy buenos resultados.

Chávez-Méndez y Col., (1995) observaron que los modelos propuestos por varios autores proponían que la transferencia de masa durante el secado de alimentos es dependiente de la difusión de agua. Para la transferencia de humedad en una placa plana:

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3.5)$$

En la expresión anterior  $X_r$  es conocida como humedad relativa. Estimaban la velocidad de secado como la derivada de la humedad con respecto al tiempo:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{2D_{eff}}{L^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) (X_o - X_e) \quad (3.6)$$

Observaron que para la simulación de procesos continuos de secado es necesario evaluar la velocidad de secado como una función de humedad a cada iteración, ya que la ecuación 3.6 no es explícita para la humedad. Ellos desarrollaron el siguiente modelo de alto orden:

$$\frac{dX}{dt} = k_1 X_r^{k_2} \quad (3.7)$$

integrando esta ecuación para obtener la expresión de velocidad de secado

$$X_r = \left[ 1 - \frac{(1-k_2)k_1 t}{X_o - X_e} \right]^{\frac{1}{1-k_2}} \quad \text{para } k_2 > 1 \quad (3.8)$$

$$X_r = \exp\left(-\frac{k_1 t}{X_o - X_e}\right) \quad k_2 = 1 \quad (3.9)$$

Demostraron que el modelo de alto orden describe las curvas de secado para dos diferentes productos de alimentos; y es matemáticamente simple y fácil de aplicar para simular procesos de secado.

Smirnov y Lysenco, (1989) encuentran que el proceso de secado es descrito satisfactoriamente por la ecuación:

$$\frac{d^2W}{d\tau^2} + 2P^2(\tau - \tau_0) \frac{dW}{d\tau} = 0 \quad (3.10)$$

y en casos especiales:

$$\frac{d^2W}{d\tau^2} + Kf(\tau - \tau_0) \frac{dW}{d\tau} = 0 \quad (3.11)$$

en donde P,  $\tau_0$  y k son constantes y  $f(\tau - \tau_0)$  es una función no lineal. Establecen que la ecuación 3.11 describe puntualmente los procesos que incluyen periodo de calentamiento, periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente de las curvas de secado de la forma "S". La solución general de la ecuación 3.10 es:

$$W = (B(1 - \text{erf}(P(\tau - \tau_0))) + A \quad (3.12)$$

$$B = 0.5 (W_e - W_o) \quad (3.13)$$

$$C = W_o \quad (3.14)$$

$$\text{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt \quad (3.15)$$

La ecuación 3.10 genera la siguiente expresión para la velocidad de secado

$$\frac{dW}{d\tau} = -\frac{2BP}{\sqrt{\pi}} e^{-P^2(\tau - \tau_0)^2} \quad (3.16)$$

También describen un método general para encontrar los parámetros A y P aplicado a un ejemplo con datos de secado, obteniéndose buenos resultados.

Los modelos propuestos en este trabajo son:

Modelo exponencial

$$X = n(e^{-bt} - 1) + (X_o - X_e) \quad (3.17)$$

Modelo suma de exponenciales

$$X = (X_o - X_e) - n(be^{-at} - ae^{-bt} - 1) \quad (3.18)$$

donde:

$X_o$  = humedad inicial

$X_e$  = humedad de equilibrio

a, b y n parámetros de ajuste

## **CAPITULO IV DISCUSION DE RESULTADOS.**

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos en el secado de hojuelas de avena utilizando un secador de túnel con charolas y un termoanalizador. Además, se aplican los modelos: exponencial, suma de exponenciales y el propuesto por Smirnov a los datos experimentales para obtener las curvas de velocidad de secado. Una vez obtenidas las curvas de velocidad, se calcula el coeficiente de difusividad efectiva y los coeficientes de transferencia de masa y calor.

### **4.1 Curvas de secado obtenidas en el secador de túnel con charolas.**

A continuación se analiza el efecto de la temperatura sobre la pérdida de humedad en el secado de hojuelas de avena. El contenido de humedad inicial en las muestras se preparó por el método descrito en 3.2.1. En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran los resultados de pérdida de humedad a diferentes temperaturas y velocidad de aire de 1.0 y 1.6 m/s. En estas gráficas se muestra un efecto significativo en el que a temperaturas mayores se requiere menor tiempo de secado. Las curvas de pérdida de humedad sólo muestran los efectos externos durante el secado.

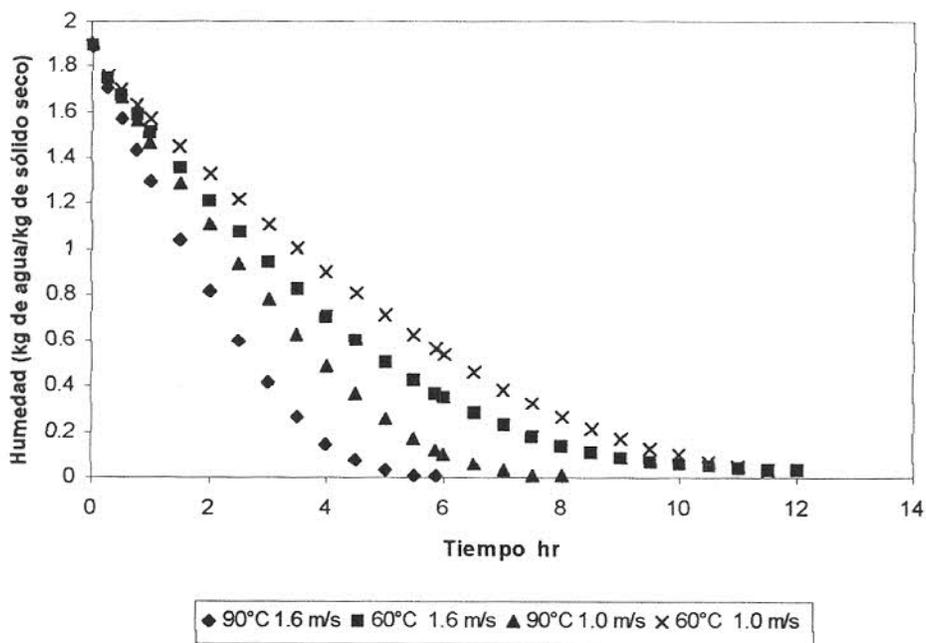


Figura 4.1 Curva de pérdida de humedad en el secado de hojuelas de avena a una velocidad de aire de 1.6 m/s.

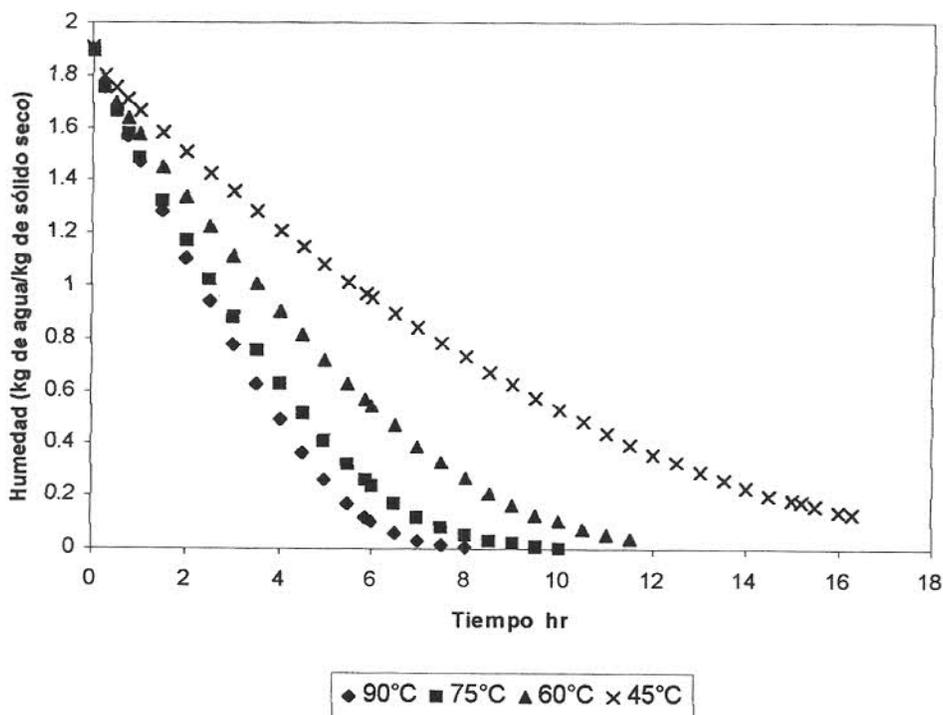


Figura 4.2 Curva de pérdida de humedad en el secado de hojuelas de avena a una velocidad de aire de 1.0 m/s.

### 4.2 Efecto de la velocidad de aire sobre la pérdida de humedad.

Para analizar el efecto de la velocidad de aire sobre la pérdida de humedad se muestran las figuras 4.3 y 4.4.

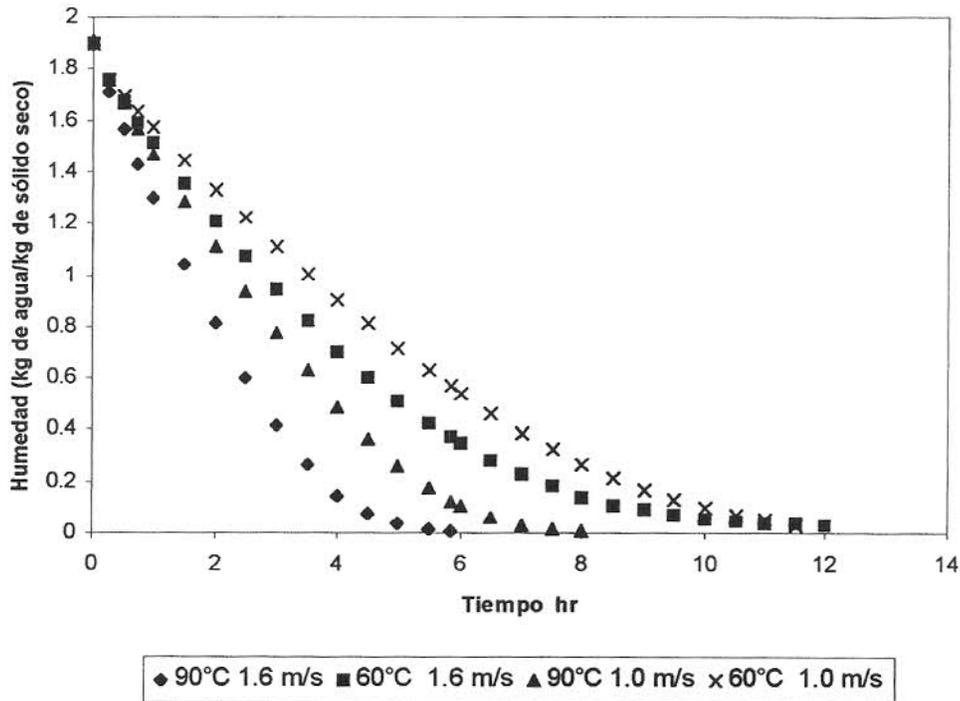


Figura 4.3 Curva de pérdida de humedad a diferentes velocidades de aire para temperaturas de 90 y 45°C.

En la figura 4.3 podemos observar que para las temperaturas de 90°C y 60°C a mayor velocidad de aire el tiempo de secado que se requiere es menor. Los efectos de temperatura y velocidad del aire son aditivos. La diferencia que se observa entre cada velocidad de aire se debe a que cuando la velocidad es mayor, aumenta la pérdida de humedad debido a que el fenómeno convectivo es más intenso. Mulet y Col., (1987), establecen que a mayor velocidad del aire el efecto dominante es convectivo, y a menor velocidad del aire el efecto dominante es difusivo.

El mismo efecto de la velocidad de aire se observa en la figura 5.4 para las temperaturas de 75 °C y 45°C.

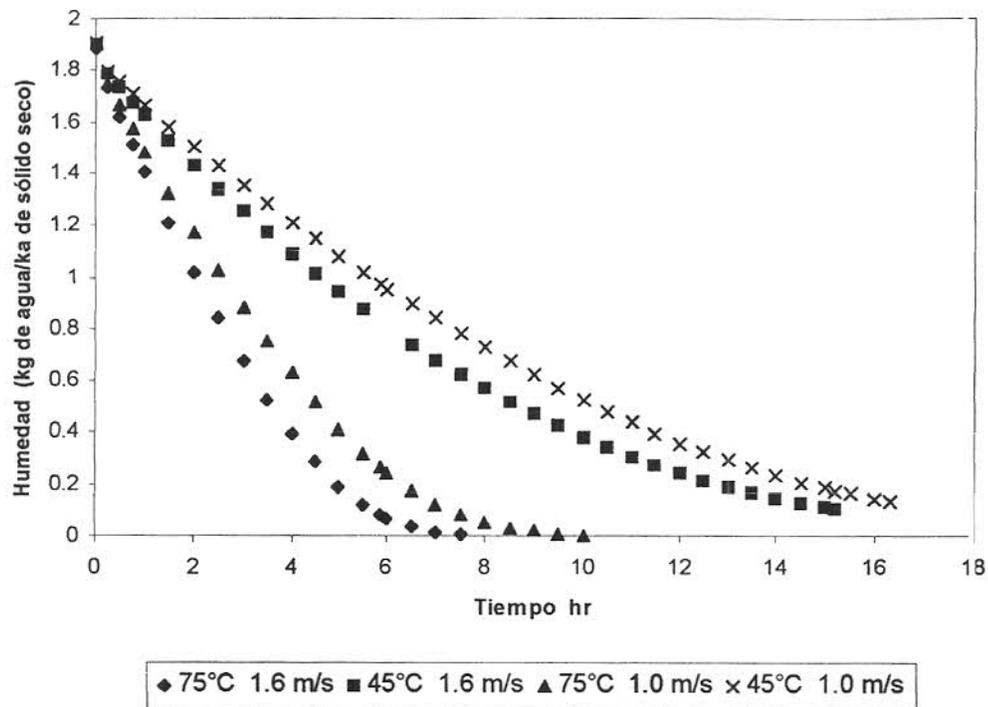


Figura 4.4 Curva de pérdida de humedad a diferentes velocidades de aire para las temperaturas de 75°C y 45 °C.

Se puede observar que para la misma temperatura existe menor resistencia a la transferencia de masa externa para una velocidad de aire mayor.

### 4.3. Obtención de las curvas de velocidad de secado.

Los datos obtenidos en un experimento de secado se pueden expresar como velocidad de secado (pérdida de humedad o pérdida de peso en un intervalo de tiempo).

Al obtener las curvas de velocidad de secado se observan principalmente tres etapas: (I) etapa de calentamiento de la muestra a la temperatura de secado, (II) evaporación de la humedad de la superficie del sólido ocurriendo a una velocidad constante y,

(III) un periodo de velocidad decreciente. En las figuras 4.5 y 4.6 se muestran los resultados de la velocidad de secado, obtenidos al aplicar la ecuación 2.1 a diferentes intervalos de tiempo, para velocidades de aire de 1.6 y 1.0 m/s.

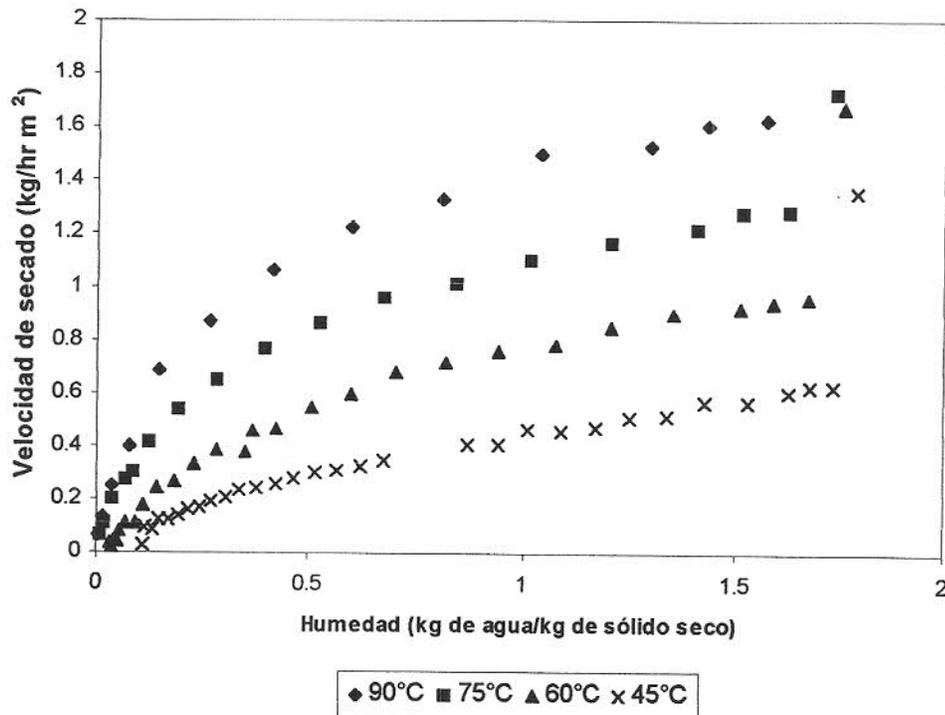


Figura 4.5 Curva de velocidad de secado experimental para una velocidad de aire de 1.6 m/s.

Obsérvese que en la figura 4.5 existe un periodo de velocidad constante no bien definido, debido a que no existe exceso de agua en la muestra y un periodo de velocidad decreciente, siendo este último más definido. La velocidad de secado en el periodo de velocidad constante se determina por las condiciones externas del material a secarse, incluyendo temperatura y velocidad del aire.

Durante el periodo de velocidad constante, la superficie del material está húmeda, todo el calor transferido del aire es usado para la evaporación del agua de la superficie, lo cual indica que existe el fenómeno de evaporación. Morgan y Yezanis (1967), indican que cuando en la superficie existe un número de poros llenos, la remoción del líquido de los poros produce curvaturas de la superficie

líquida creando fuerzas capilares y generando remoción de humedad por acción capilar.

En el periodo de velocidad decreciente disminuye gradualmente el contenido de humedad a la superficie y la resistencia interna del transporte de agua aumenta. La temperatura de la muestra aumenta lo cual produce un gradiente de presión de vapor que genera difusión de vapor hacia la superficie y la zona de evaporación se realiza en el interior del material.

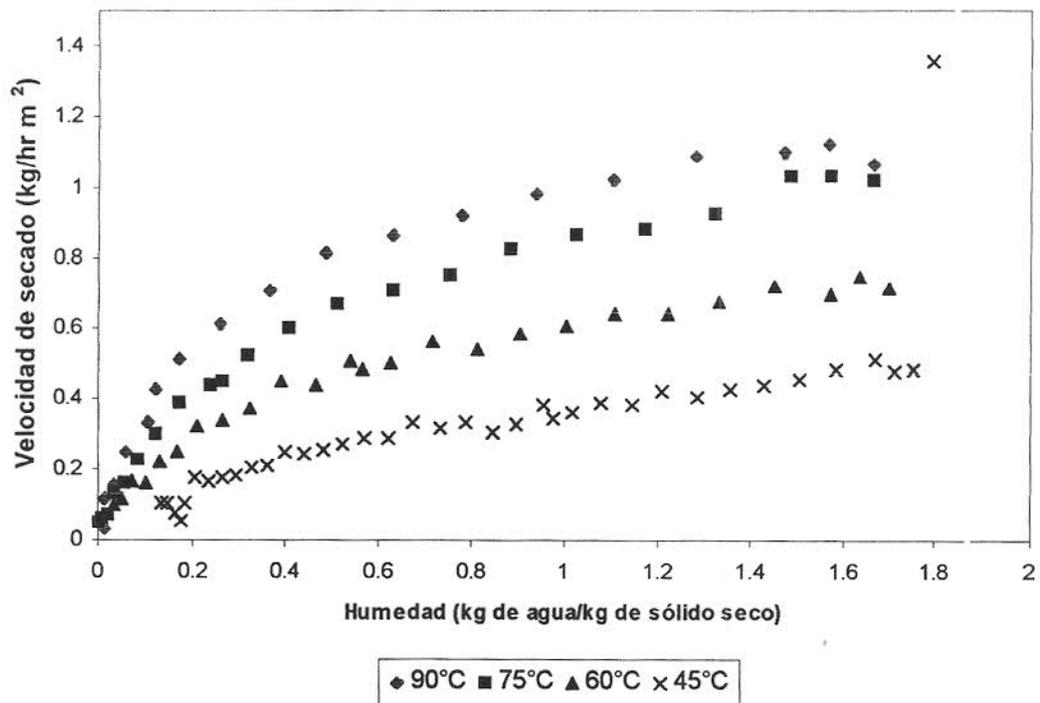


Figura 4.6 Curva de velocidad de secado experimental para una velocidad de aire de 1.0 m/s

Se puede observar en la figura 4.6, un periodo de velocidad constante para cada temperatura, lo cual se debe a la menor velocidad del aire debido a la evaporación es afectada por la velocidad del aire. Los valores de la velocidad de secado son menores comparados con los obtenidos con una velocidad de aire de 1.6 m/s. Se puede decir que la velocidad de secado se incrementa con la velocidad del aire.

Los parámetros de los modelos propuestos fueron ajustados usando el paquete NCSS97 (en el Apéndice C se presentan los valores de los parámetros y el coeficiente de correlación del modelo). Para los resultados de pérdida de humedad, los modelos describen adecuadamente los perfiles de pérdida de peso. El caso de mayor temperatura y mayor velocidad de aire (90°C y 1.6 m/s), se muestra en la figura 4.7.

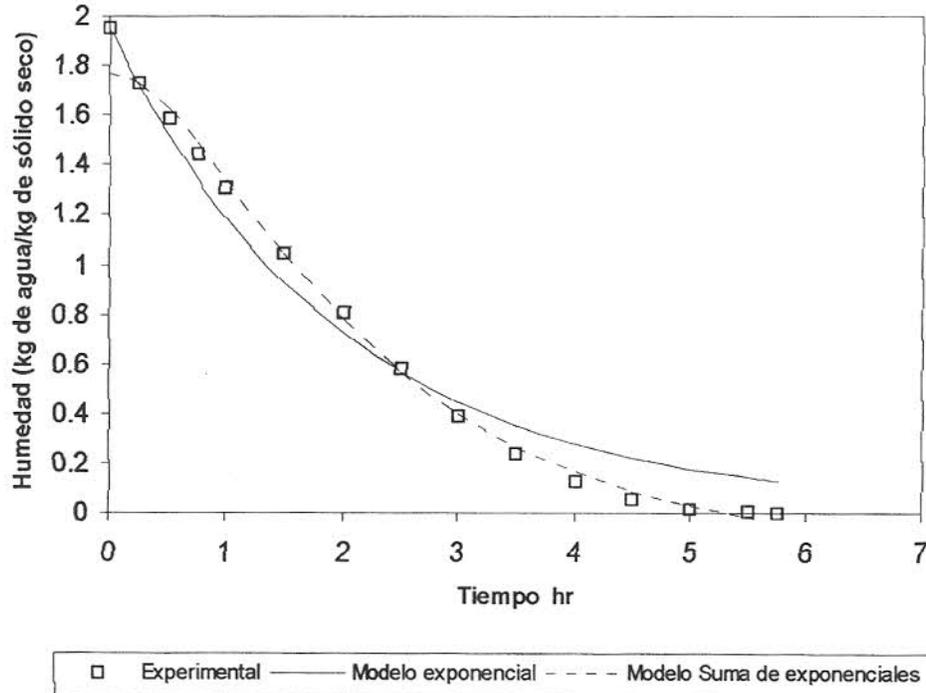


Figura 4.7 Comportamiento de los modelos, para curvas de pérdida de humedad, para una temperatura de 90°C y 1.6 m/s.

En la figura 4.7 se observa que el modelo suma de exponenciales es el que más se aproxima a los datos experimentales ( $r^2=0.9937$  y el modelo exponencial  $r^2=0.9713$ ). El modelo suma de exponenciales parte de la suposición de que los fenómenos que ocurren son difusivos (de la solución de la ecuación de Fick's), sin embargo la inclusión de más términos exponenciales establecería que es dominante la difusión, ya que el modelo aumenta su aproximación.

Una vez obtenidos estos parámetros, se calculó la derivada del modelo para obtener las curvas de velocidad de secado. La cinética de secado de sólidos puede ser descrita por los dos periodos dominantes: periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente. La aplicación de los modelos para las curvas de velocidad de secado, para el caso de 90°C y 1.6 m/s (mayor velocidad y mayor temperatura) se observan en la figura 4.8.

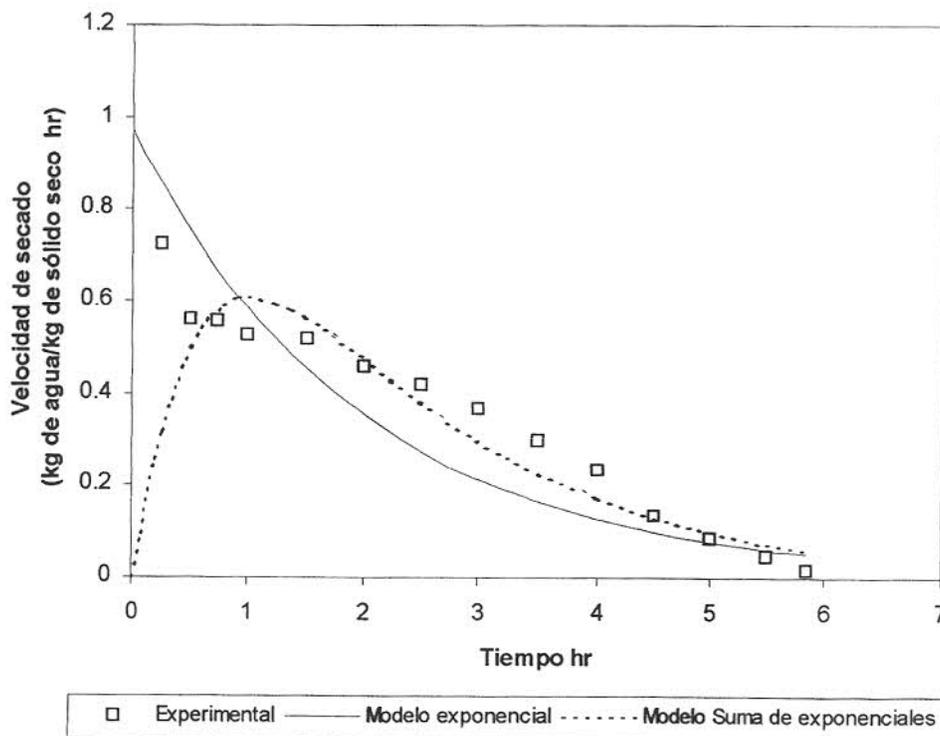


Figura 4.8 Comportamiento de los modelos para las curvas de velocidad de secado, para el caso de 90°C y 1.6 m/s.

En la figura 4.8, se puede observar que ambos modelos fallan para predecir las curvas de velocidad de secado. Esto se debe a falta de términos que incluyan otros mecanismos, es por eso que el modelado de secado es bastante complejo.

Para comprobar el modelo de Smirnov y Lysenco, (1989) se preparó una muestra con suficiente humedad en exceso para que presentara el periodo de velocidad constante, las condiciones del experimento fueron de 90°C y 1.6 m/s, la comparación de éste modelo y el modelo exponencial, con los resultados experimentales se muestran en la figura 4.9.

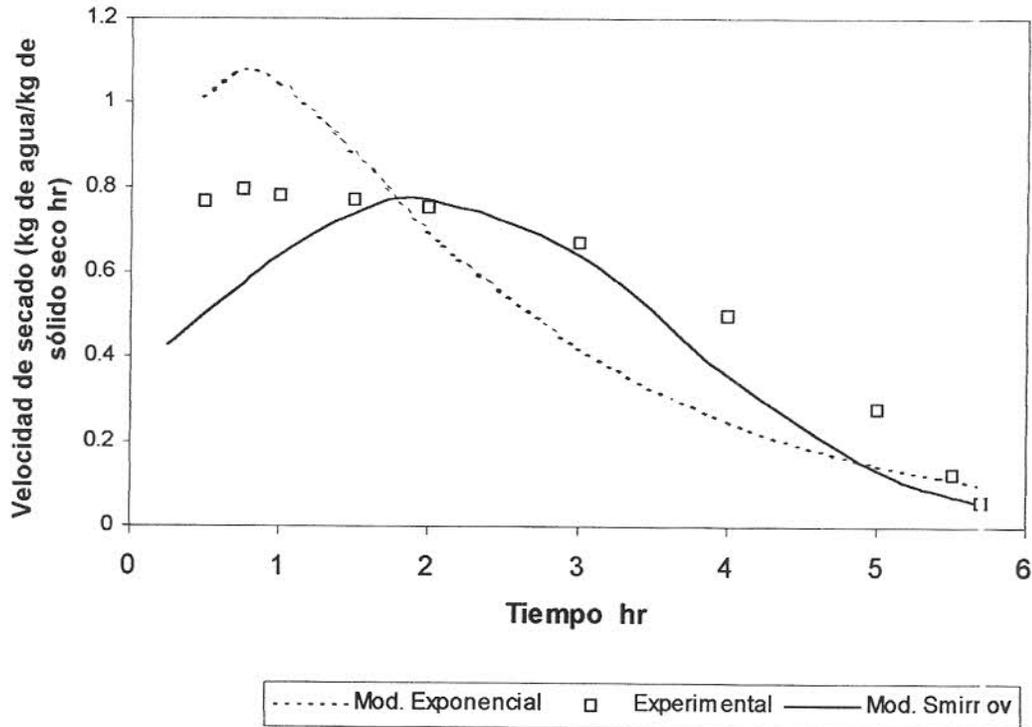


Figura 4.9 Comportamiento de los modelos a una muestra saturada.

En la figura 4.9 se observa que el modelo propuesto por Smirnov presenta mayor aproximación que el modelo exponencial, solo que se aplica a muestras sobresaturadas.

#### 4.5 Curvas de secado obtenidas en el Termoanalizador.

Como se mencionó en la sección 3.3.3, las pruebas realizadas en el termoanalizador corresponden a las mismas temperaturas aplicadas en el secador de túnel, a diferencia que las velocidades de aire corresponden a 0.34 m/s y 0.78 m/s. Otra diferencia es que el termoanalizador utiliza solo una hojuela de avena y la dirección del flujo de aire es perpendicular a la hojuela. En la figura 4.10 se muestra el efecto de la temperatura sobre la pérdida de humedad de la hojuela.

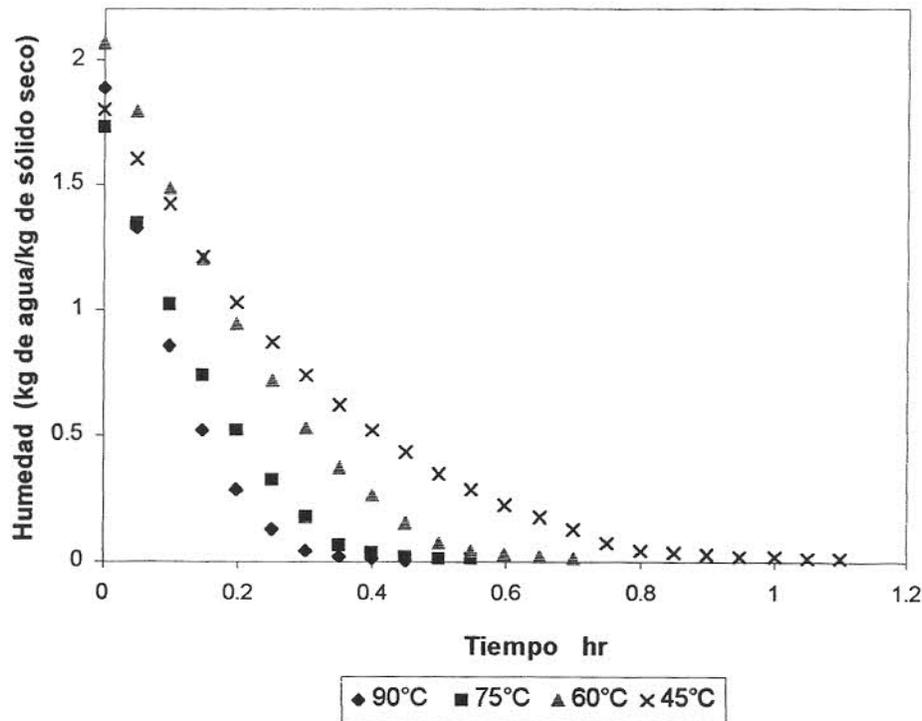


Figura 4.10 Curva de pérdida de humedad en el secado de hojuelas de avena utilizando el Termoanalizador con una velocidad de aire de 0.78 m/s.

En esta gráfica podemos observar que a mayor temperatura el tiempo de secado que se requiere es menor. Lo mismo pasa con una velocidad de aire de 0.34 m/s, como se observa en la figura 4.11.

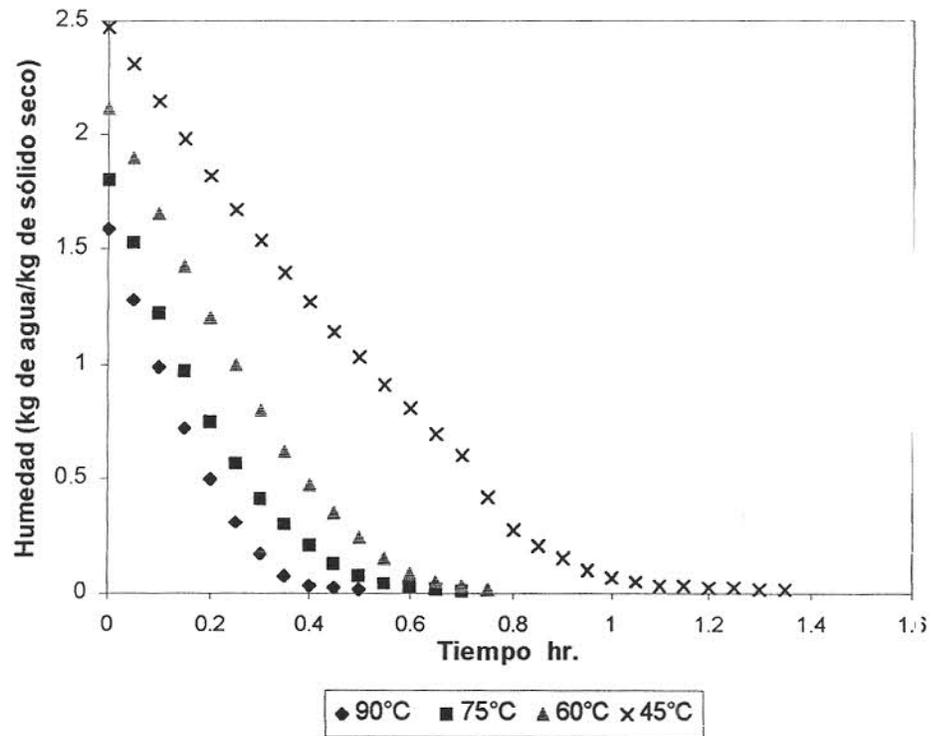


Figura 4.11 Curva de pérdida de humedad en el secado de hojuelas de avena utilizando el Termoanalizador con una velocidad de aire de 0.34 m/s.

#### 4.6 Curvas de velocidad de secado obtenidas en el Termoanalizador.

El termoanalizador proporciona los resultados de DTG, la variación del peso en función del tiempo. En las figuras 4.12 y 4.13 se presentan los resultados para una velocidad de 0.78 m/s y 0.34 m/s.

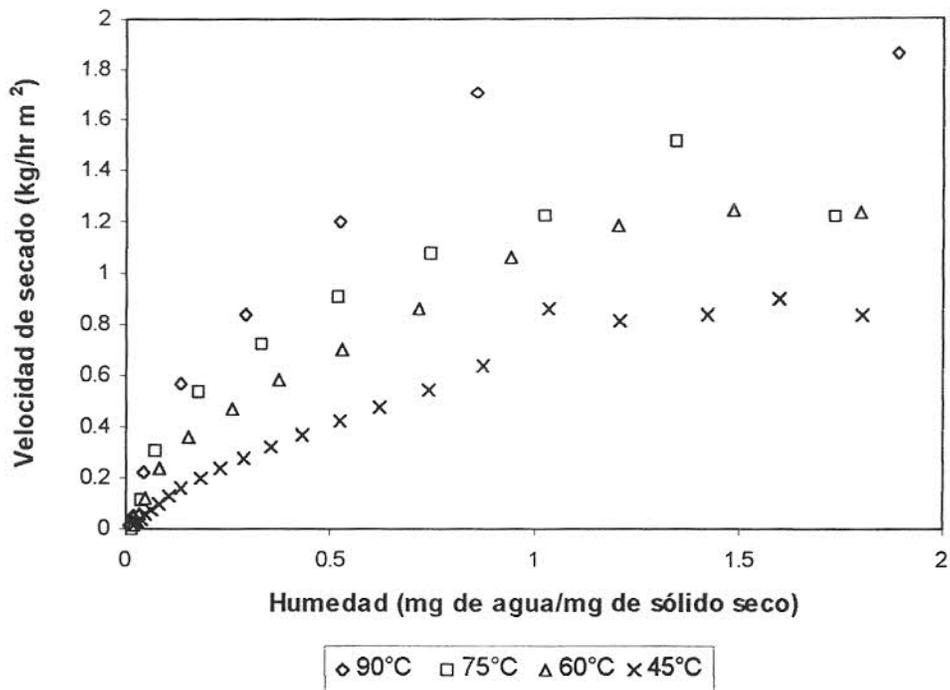


Figura 4.12 Curva de velocidad de secado de una hojuela de avena utilizando el Termoanalizador y una velocidad de aire de 0.78 m/s.

En la figura 4.12 se observa que no existe periodo de velocidad constante para las temperaturas de 75 y 90°C debido a que la evaporación en la superficie a estas temperaturas es más rápida que para las otras temperaturas. Algo similar se observa en la figura 4.13 para una velocidad de aire de 0.34 m/s.

De los resultados obtenidos en el Termoanalizador (figuras 4.9 – 4.13) se observa cierta similitud con los resultados obtenidos en el secador de túnel con charolas.

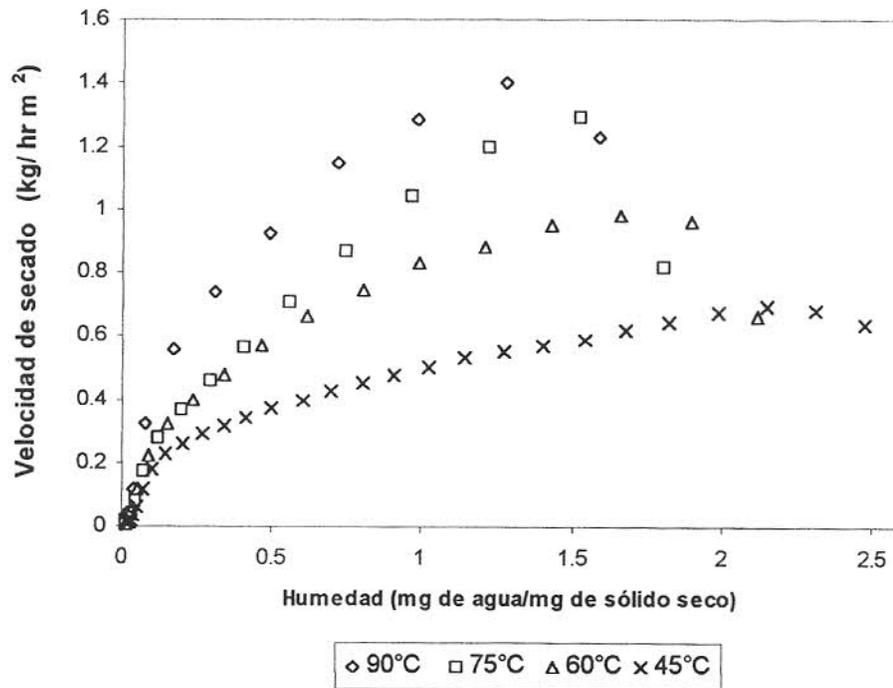


Figura 4.13 Curva de velocidad de secado de una hojuela de avena utilizar do el Termoanalizador y una velocidad de aire de 0.34 m/s.

#### 4.7 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor en el secador de túnel con charolas.

Una vez obtenidas las curvas de velocidad de secado se calcularon los coeficientes de transferencia de calor. Se aplicó la ecuación 2.8 presentándose los resultados en la figura 4.14

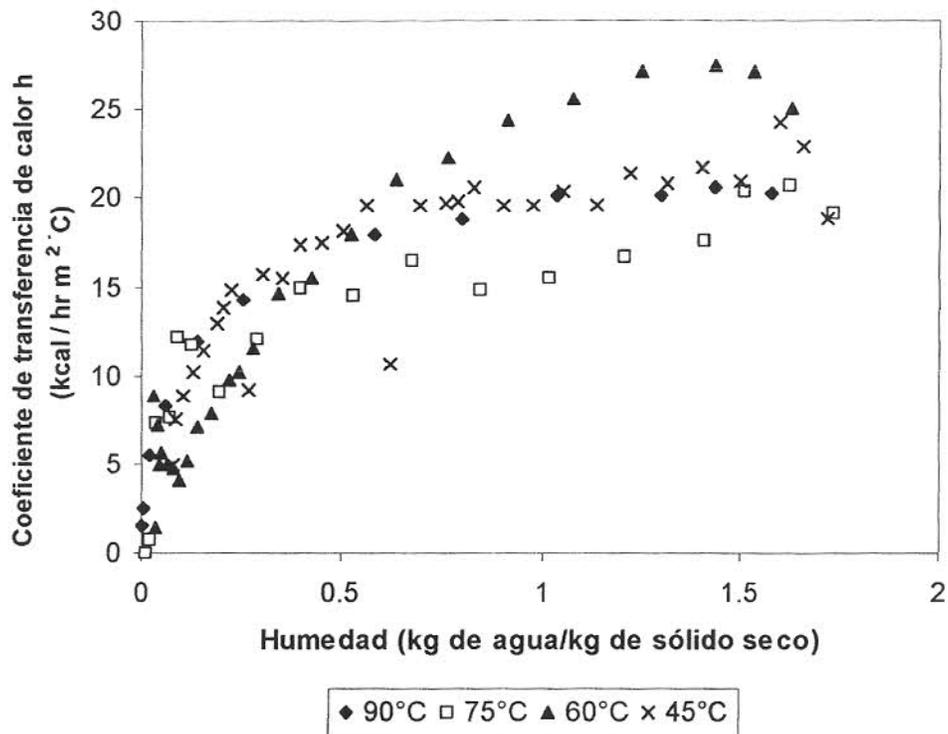


Figura 4.14 Coeficientes de transferencia de calor en el secado de hojuelas de avena para una velocidad de 1.6 m/s.

En la figura 4.14 se puede observar que para menor temperatura de secado el coeficiente de transferencia de calor es mayor. Se establece que para un valor mayor de h existe menor resistencia al flujo de calor. Además, se observa que existen valores que se mantienen constantes, los cuales acontecen durante el periodo de velocidad constante, donde la temperatura de la muestra se mantiene constante e igual a la temperatura del bulbo húmedo ocurriendo evaporación en la superficie. A medida que avanza el proceso de secado, el coeficiente de transferencia de calor h disminuye, lo cual establece que la resistencia al flujo de calor aumenta, esto se debe a que se requiere mayor cantidad de calor para evaporar la humedad que se encuentra en el interior del material, aumentando la resistencia al flujo de humedad hacia la superficie.

Para el caso de una velocidad de aire de 1.0 m/s los resultados se presentan en la figura 4.15.

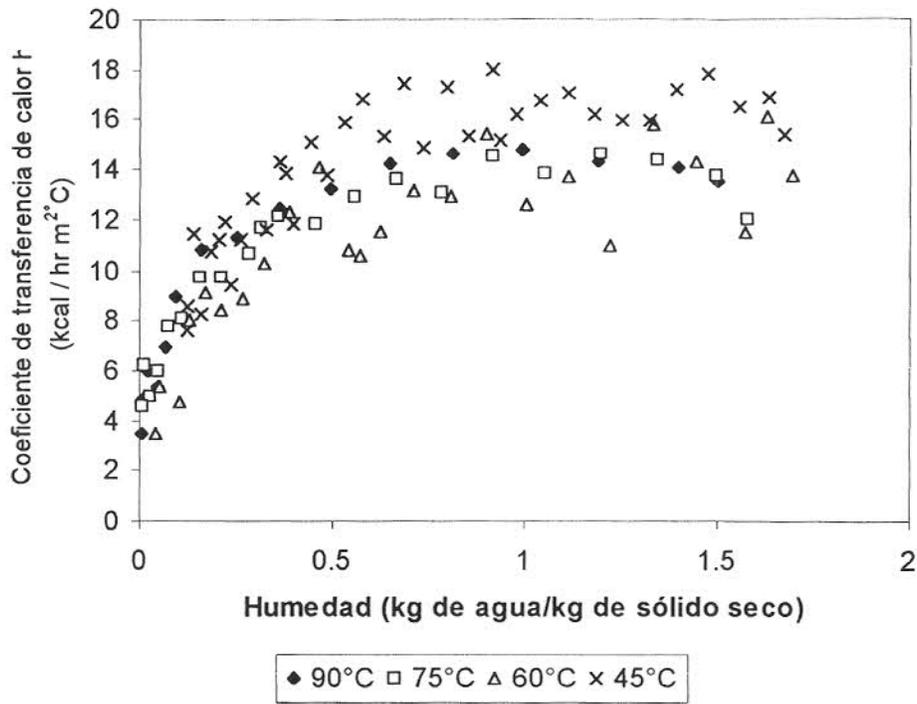


Figura 4.15 Coeficientes de transferencia de calor en el secado de hojuelas de avena para una velocidad de 1.0 m/s.

Se observa el mismo efecto de los valores de  $h$  con respecto a la temperatura. Los valores mayores de  $h$ , se presentan cuando el contenido de humedad es mayor, presentándose de manera constante, lo cual indica que ocurre evaporación en la superficie. Después, el coeficiente de transferencia de calor  $h$ , comienza a disminuir, indicando que la evaporación ocurre en el interior del sólido. A bajos niveles de humedad el valor de  $h$  disminuye, debido a que aumenta la temperatura del sólido provocando flujo de vapor del interior hacia la superficie del sólido, generando difusión de vapor por lo que el flujo de vapor es dominante. Podemos establecer que durante el periodo de velocidad constante el efecto dominante es la transferencia de calor.

#### 4.8 Cálculo de los coeficientes de transferencia de masa en el secador de túnel con charolas.

La transferencia de masa juega un importante papel en el secado. El agua (en estado líquido o vapor) de los sólidos tiende a emigrar en diferentes mecanismos cuando se varía su presión y temperatura en el sistema. Para observar el efecto de la transferencia de masa en el secado de hojuelas de avena a diferentes temperaturas y velocidades de aire se calculó el coeficiente de transferencia de masa.

La transferencia de masa puede tomar lugar de varios modos, uno de ellos es la difusión. Difusión se llama al proceso en el cual la masa es transportada de una parte de un sistema a otro como resultado de un gradiente de concentración con un movimiento aleatorio, este movimiento se observa de una región de mayor concentración a una región de menor concentración. Una forma de medir la difusión es por medio del coeficiente de difusividad efectiva  $D_{\text{eff}}$ , el cual es una medida de varios mecanismos de transporte de materia, que puede incluir: difusión de líquido y vapor, difusión molecular y otros posibles mecanismos de transferencia de masa. Los resultados de la  $D_{\text{eff}}$  se calcularon con la ecuación 2.35, método de pendientes. Para los datos de secado de hojuelas de avena para una velocidad de aire de 1.6 m/s se presentan en la figura 4.16

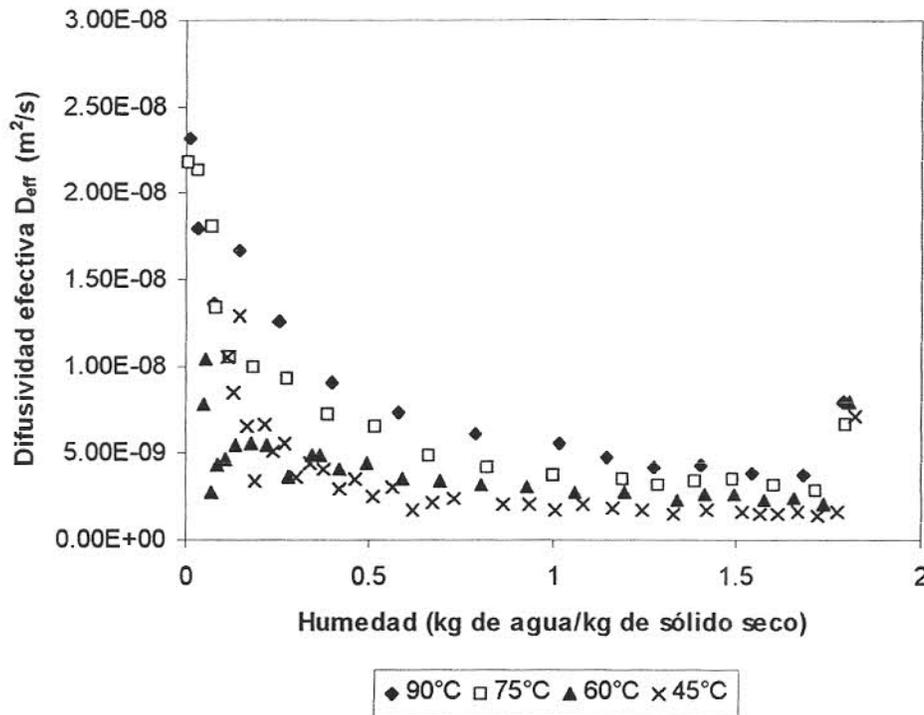


Figura 4.16 Difusividad efectiva durante el secado de hojuelas de avena para una velocidad de aire de 1.6 m/s.

En la figura 4.16 se observa que la difusividad efectiva  $D_{eff}$  incrementa con la temperatura; la  $D_{eff}$  es constante al inicio del secado (mayor contenido de humedad) indicando que ocurre difusión del líquido. Además se observa que la  $D_{eff}$  aumenta cuando se reduce el contenido de humedad del sólido. Esto se debe que a medida que continua el secado la temperatura de la muestra aumenta, originando que la presión de vapor en el interior del material aumente generando un gradiente de vapor cada vez mayor y la difusión de vapor tiende a aumentar más que la difusividad de líquido, lo cual incrementa la difusividad efectiva. La difusión de líquido es dominante en el interior del sólido a altos niveles de humedad, mientras la difusión de vapor es dominante a bajo contenido de humedad y a regiones cerradas a evaporación frontal.

En la figura 4.17 se observa el efecto de la  $D_{eff}$  para una velocidad de aire de 1.6 m/s y 90°C. Al inicio del secado la  $D_{eff}$  se mantiene constante debido a que el principal

mecanismo puede ser difusión líquida; la difusión  $D_{eff}$  incrementa, indicando que predomina la difusión de vapor y al final del secado, la  $D_{eff}$  sufre una disminución, la cual se puede suponer que la humedad esta fuertemente enlazada a la estructura química del material.

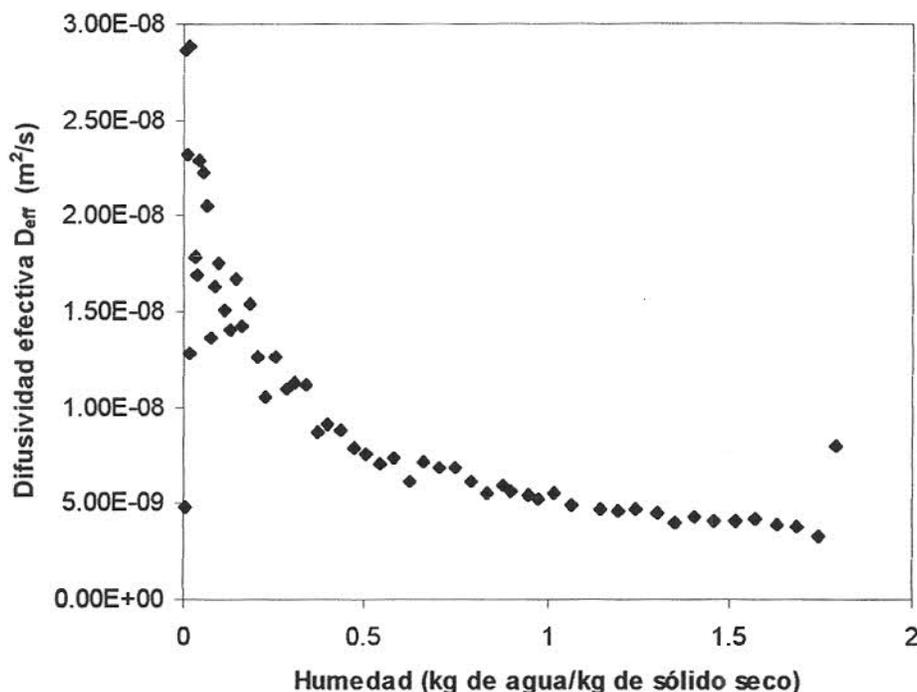


Figura 4.17 Difusividad efectiva durante el secado de hojuelas de avena para una temperatura de 90°C y una velocidad de aire de 1.6 m/s.

La  $D_{eff}$  del agua puede estar relacionada con la porosidad del material. Al inicio del secado donde domina la difusividad líquida, la porosidad puede mantenerse constante y cuando domine la difusión de vapor la porosidad disminuya originando que el material se contraiga, lo cual sucede con las hojuelas de avena.

Se observa en las figuras 4.17 y 4.18, que la  $D_{eff}$  varía significativamente con el contenido de humedad, y con la temperatura del material. Se planteó el siguiente modelo tipo exponencial a los resultados de  $D_{eff}$  en el secado de hojuelas de avena:

$$D_{eff} = \exp\left[\frac{1}{a+bT_s} + \frac{1}{c+dX_s}\right] \quad (4.1)$$

donde a, b, c y d son parámetros de ajuste,  $T_s$  y  $X_s$  son la temperatura y humedad de la muestra respectivamente. En el Apéndice C, se presentan los valores de los parámetros de ajuste y su coeficiente de correlación  $r^2$  para todos los experimentos realizados. En la figura 4.18, se presenta el modelo de  $D_{eff}$  comparado con los datos experimentales, el factor de correlación es de  $r^2 = 0.9266$ .

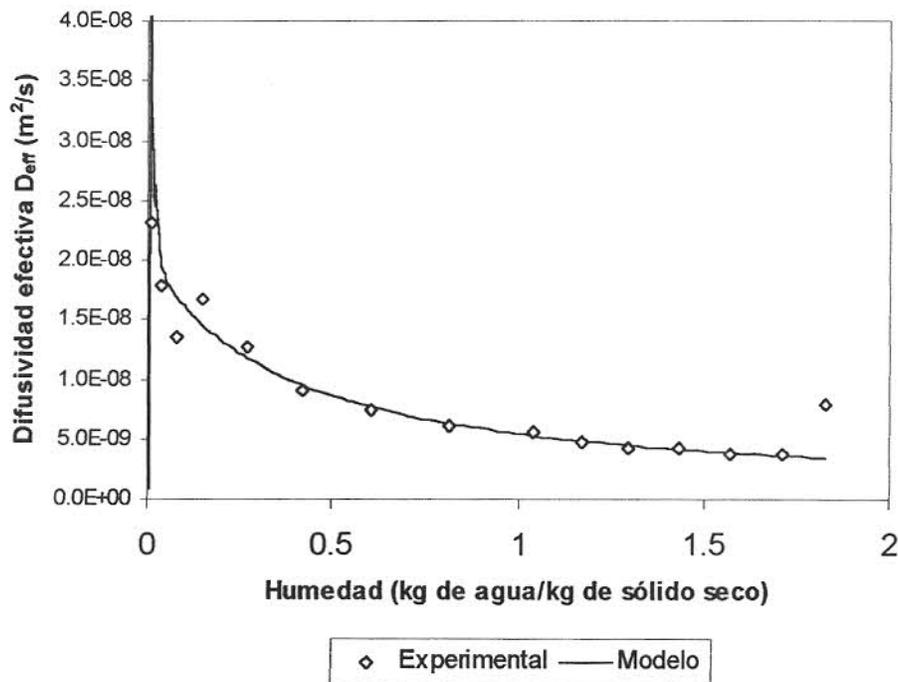


Figura 4.18 Comportamiento del modelo de difusividad efectiva.

El cálculo del coeficiente de transferencia de masa se realizó utilizando la ecuación 2.6, la humedad del aire saturado en la interfase se obtuvo suponiendo que la temperatura en el material es igual a la temperatura en la interfase. En la figura 4.19 se presentan los resultados para una velocidad de aire de 1.6 m/s.

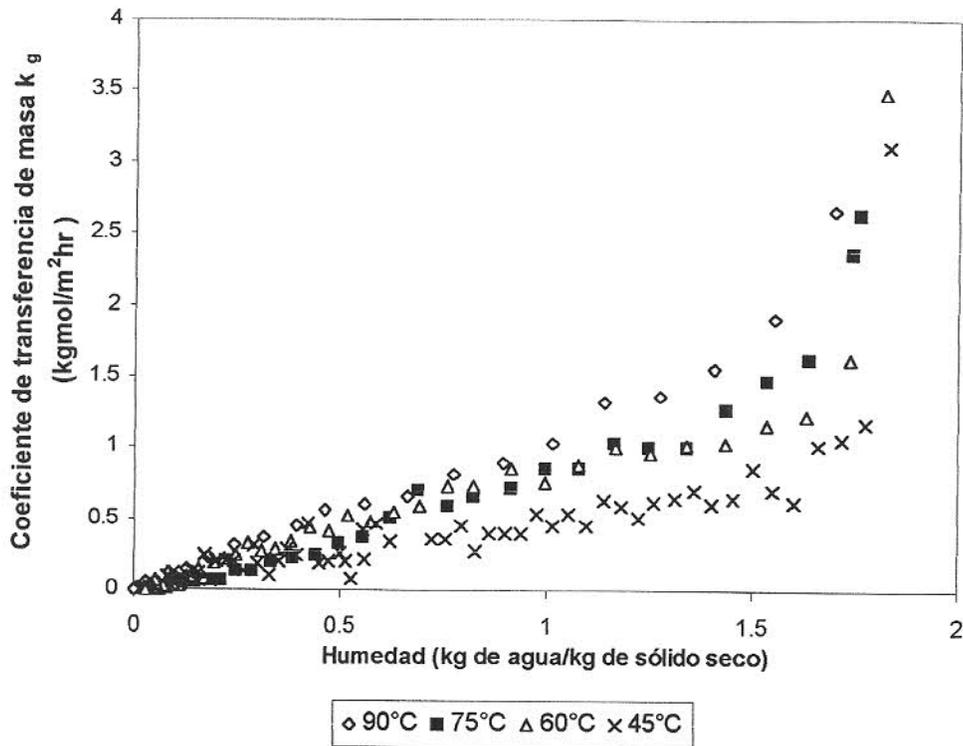


Figura 4.19 Coeficiente de transferencia de masa en el secado de hojuelas de avena para una velocidad de aire de 1.6 m/s.

En la figura 4.19, se puede observar que el coeficiente de transferencia de masa es mayor para temperaturas mayores, además, disminuye en dos periodos, uno en el cual sufre una caída marcadamente, y otro en el cual disminuye en forma lineal con la humedad. Al inicio del secado donde la humedad del sólido es mayor, el coeficiente de transferencia de masa disminuye marcadamente, durante el cual ocurre difusión de líquido, y la resistencia al flujo de masa es menor; en el segundo periodo el coeficiente de transferencia de masa, disminuye indicando que aumenta la resistencia al flujo de masa, en este periodo la transferencia de masa es por difusión de vapor. Los resultados del coeficiente de transferencia de masa para una velocidad de aire de 1.0 m/s se muestran en la figura 4.20.

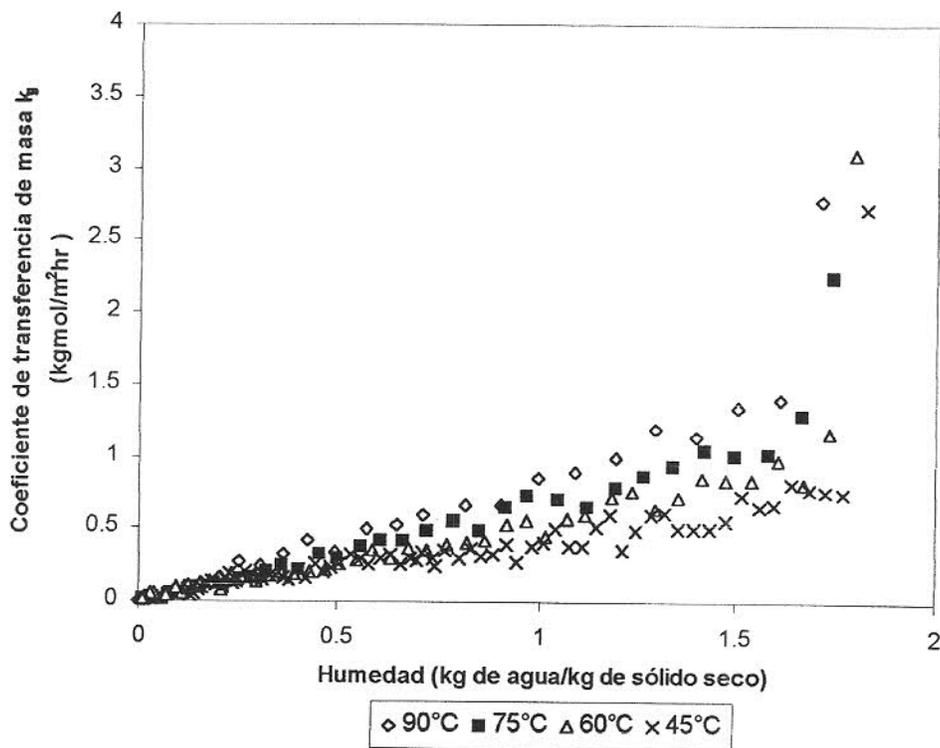


Figura 4.20 Coeficiente de transferencia de masa en el secado de hojuelas de avena para una velocidad de aire de 1.0 m/s.

El coeficiente de transferencia de masa disminuye cuando disminuye la velocidad del aire como se observa en la figura 4.20. En la última etapa de secado los efectos internos llegan a ser los mismos para cada temperatura.

Una forma para relacionar los fenómenos internos que acontecen durante el secado, es, agrupando los perfiles de velocidad de secado, la temperatura del material, y los coeficientes de transferencia de calor y masa, como se observa en la figura 4.21.

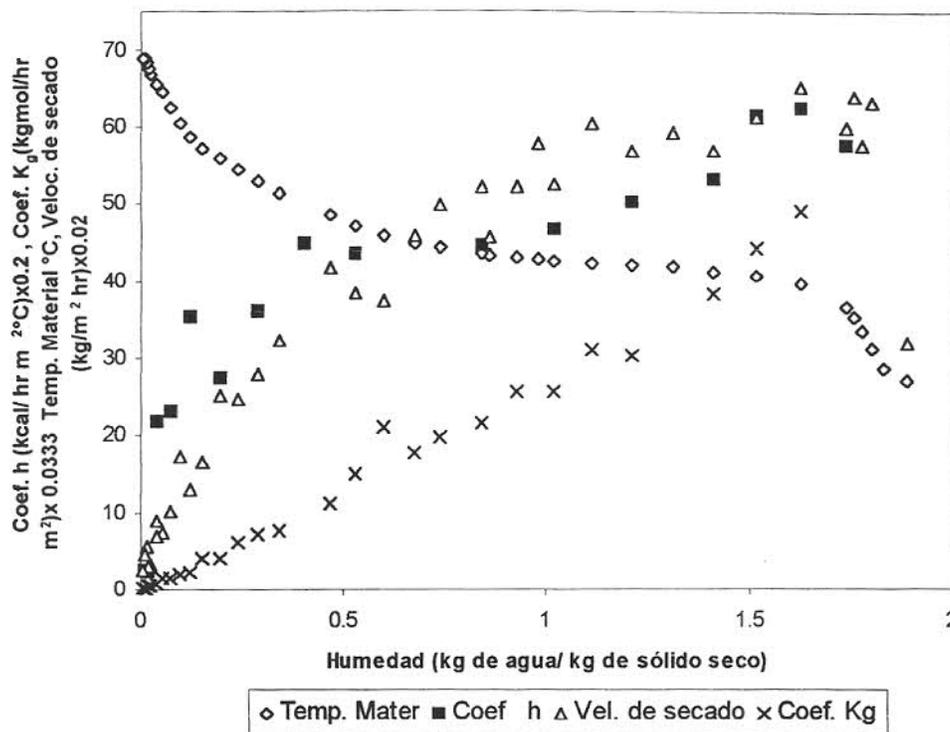


Figura 4.21 Curva de velocidad de secado, coeficientes de transferencia de calor y masa y temperatura del material a 75°C y 1.6 m/s.

En la figura 4.21 se puede observar simultáneamente como varían los coeficientes de transferencia de masa y calor, la temperatura del material con la velocidad de secado. Se observa que el periodo de velocidad decreciente presentado por la velocidad de secado muestra dos periodos. Un periodo donde la velocidad de secado varía linealmente con la humedad, durante el cual la temperatura del material aumenta en forma lineal, el coeficiente de transferencia de calor  $h$ , se mantiene constante, indicando que ocurre evaporación en la superficie y el coeficiente de transferencia de masa  $k_g$  disminuye marcadamente, indicando que el transporte de masa es por difusión de líquido hacia la superficie y evaporación en la superficie. El otro periodo ocurre al final de la etapa de secado, donde la velocidad de secado no disminuye linealmente, en este periodo, la temperatura del material incrementa debido a que el calor requerido para evaporar el agua del interior del sólido es más grande que el requerido para evaporar en la superficie, aumentando la resistencia al flujo de masa, el coeficiente de transferencia de calor  $h$ , disminuye en forma proporcional a la

velocidad de secado, durante este periodo se puede establecer que la evaporación ocurre en el interior del sólido, y el coeficiente de transferencia de masa  $k_g$  disminuye linealmente, indicando que el flujo de masa es por difusión de vapor. Se observa también un periodo entre el periodo constante y final, durante el cual ocurren ambos fenómenos: difusión de líquido y difusión de vapor. Como en este caso no se presentó un periodo de velocidad constante bien definido, se analizó de igual manera una muestra con exceso de agua como se muestra en la figura 4.22.

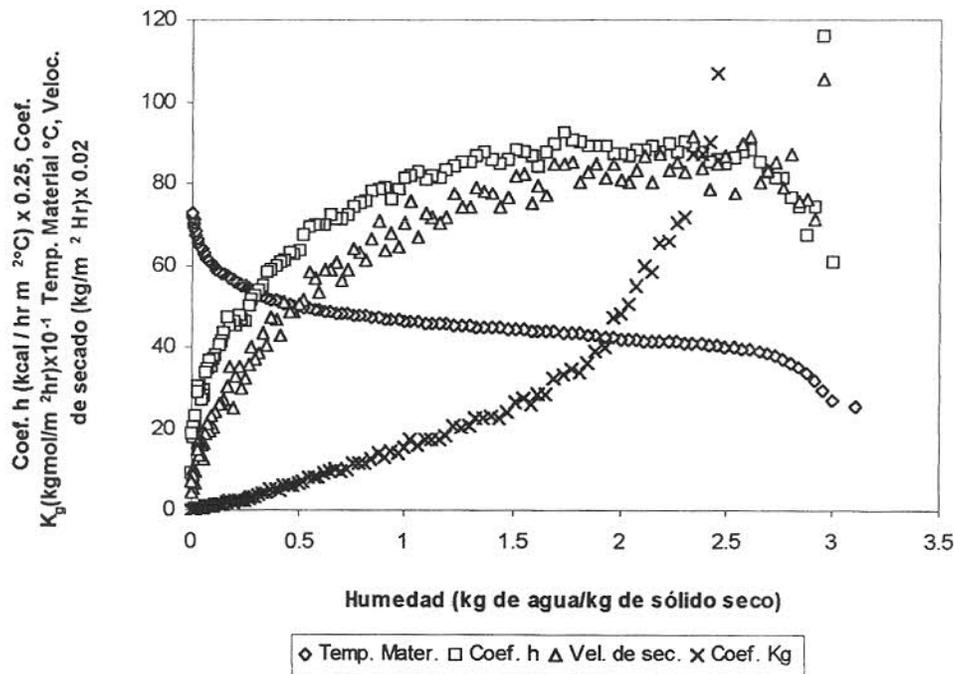


Figura 4.22 Curva de velocidad de secado, coeficientes de transferencia de calor y masa y temperatura del material a  $90^{\circ}\text{C}$  y  $1.6 \text{ m/s}$ , a una muestra con exceso de agua.

En la figura 4.22 se observa un periodo de velocidad constante durante el cual ocurre evaporación en la superficie del sólido, la temperatura del material se mantiene constante e igual a la temperatura del bulbo húmedo, el coeficiente de transferencia de calor varía en forma proporcional a la velocidad de secado y el coeficiente de transferencia de masa disminuye marcadamente. En el periodo de velocidad decreciente, la temperatura del material incrementa hasta aproximarse a la

temperatura del aire, el coeficiente de transferencia de calor disminuye proporcionalmente con la velocidad de secado, y el coeficiente de transferencia de masa disminuye linealmente con la humedad.

**5.8 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor en el Termoanalizador.**

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor obtenidos a partir de los datos de secado obtenidos en el termoanalizador se aplicó la ecuación 2.8, aplicada a los datos de secado obtenidos en el secador de charolas. Los resultados se presentan en las figuras 4.23 y 4.24.

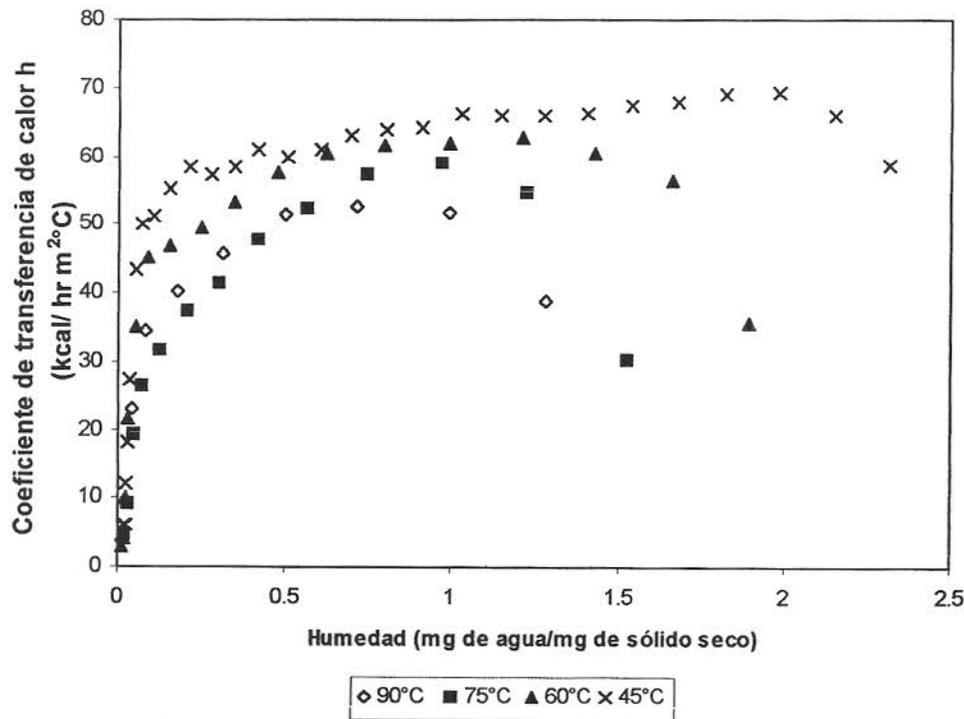


Figura 4.23 Coeficientes de transferencia de calor obtenidos en el Termoanalizador para una velocidad de aire de 0.78 m/s.

Los resultados mostrados en la figura 4.23 indican que el coeficiente de transferencia de calor h presenta un periodo constante para las temperaturas de 45, 60 y 75°C, el cual indica evaporación en la superficie del sólido, para 90°C, la evaporación en la superficie es más rápida que la transferencia de humedad del interior del sólido. El coeficiente de transferencia de calor h disminuye debido a que la evaporación se

desplaza al interior del sólido. La magnitud de  $h$  obtenido en el termoanalizador es mayor al obtenido en el secador de túnel con charolas debido a que el área expuesta al flujo de aire es mayor. Un comportamiento similar se presenta para el caso de una velocidad de aire de 0.34 m/s en la figura 4.24.

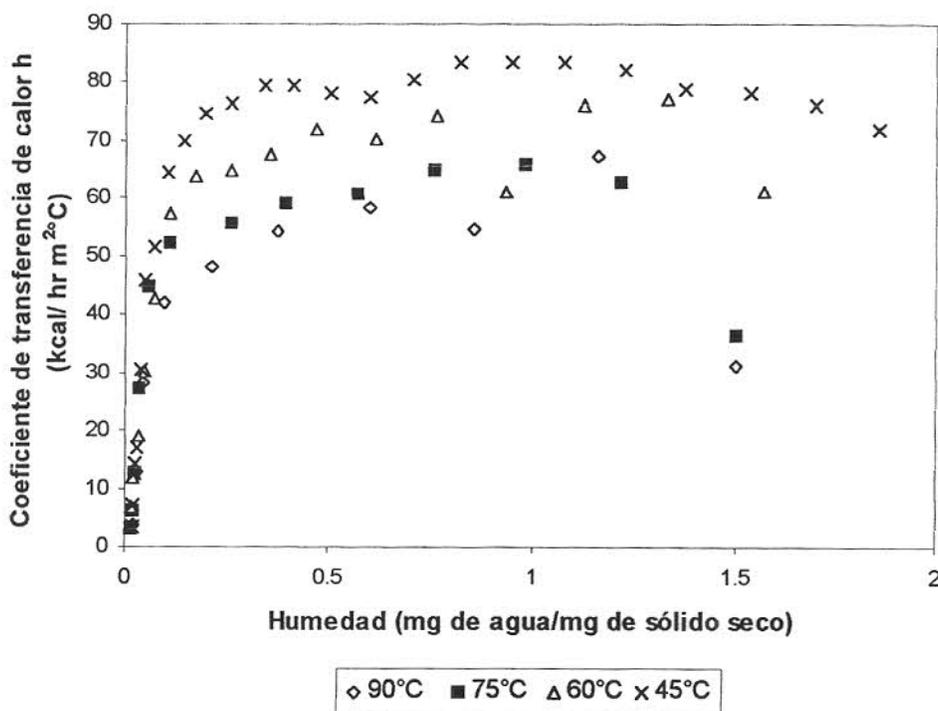


Figura 4.24 Coeficientes de transferencia de calor obtenidos en el Termoanalizador para una velocidad de aire de 0.34 m/s.

En la figura 4.24 se observa que a menor temperatura, el coeficiente de transferencia de calor  $h$  es mayor debido a que se tiene mayor resistencia al flujo de calor. Obsérvese que  $h$  presenta un periodo constante de valores, el cual es más prolongado que para la velocidad de aire de 0.79 m/s, indicando que para esta velocidad de aire ocurre más evaporación en la superficie del sólido, donde los factores externos afectan la evaporación. En la última etapa el coeficiente de transferencia de calor  $h$ , disminuye debido a que dominan los efectos internos.

La eficiencia de masa para una velocidad de aire de 0.78 m/s se presenta en la figura 4.25.

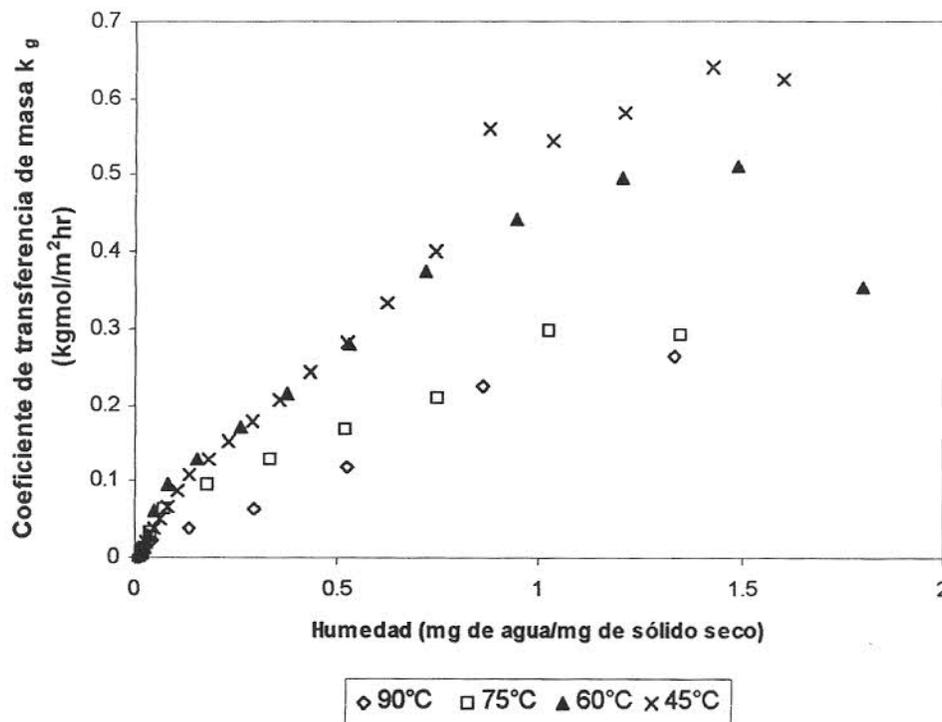


Figura 4.25 Coeficientes de transferencia de masa obtenidos en el Termoanalizador para una velocidad de aire de 0.78 m/s.

En la figura 4.25 observamos que el valor del coeficiente de transferencia de masa presenta un periodo constante durante el cual se observan los efectos externos. El coeficiente disminuye debido a que acontecen los efectos internos. Se muestra un comportamiento semejante para una velocidad de aire de 0.34 m/s en la figura 4.26.

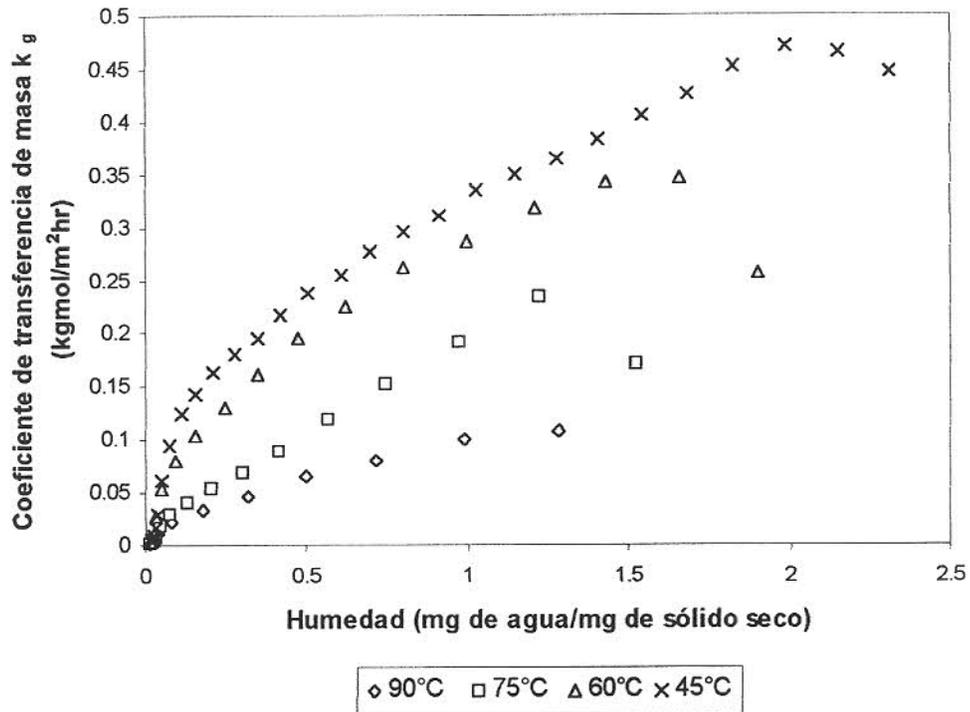


Figura 4.26 Coeficientes de transferencia de masa obtenidos en el Termoanalizador para una velocidad de aire de 0.34 m/s.

En la figura 4.26 se observa que el coeficiente de transferencia de masa es menor (que para una velocidad de 0.79 m/s), debido a que a menor velocidad de aire hay mayor resistencia al flujo de masa hacia la superficie y a la evaporación en la superficie.

Todos los valores de los experimentos presentados en este trabajo se encuentran un diskette anexo en la parte interior de la contraportada de este trabajo.

## CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

El trabajo de análisis y pruebas de laboratorio llevado a cabo para la determinación de los coeficientes de transferencia de masa y calor durante el secado de hojuelas de avena, permite establecer las siguientes conclusiones:

1. Se obtuvieron las curvas de pérdida de humedad y velocidad de secado, en las cuales se observó que son significativas la temperatura y velocidad de aire.
2. El periodo de velocidad constante, en los experimentos realizados no está bien definido para las curvas de velocidad de secado a velocidades de aire y temperaturas altas.
3. Los modelos propuestos predecían la pérdida de humedad, pero al obtener la derivada del modelo para obtener la curva de velocidad de secado fallan al compararse con los resultados experimentales.
4. Los perfiles de difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ) establecen que durante el inicio del secado existe difusividad de líquido, pero conforme disminuye la humedad la  $D_{eff}$  aumenta debido a que la difusividad es de vapor. La difusividad efectiva  $D_{eff}$  tiende a ser más sensible a la temperatura a bajos contenidos de humedad que para altos contenidos de humedad.
5. El perfil del coeficiente de transferencia de calor permite establecer que existe un periodo constante, durante el cual ocurre evaporación en la superficie, y al disminuir la humedad en el sólido, la evaporación se transfiere al interior del sólido generando mayor resistencia al flujo de calor.
6. En los perfiles de los coeficientes de transferencia de masa, se pueden suponer los efectos internos como difusión de líquido hacia la superficie generando evaporación en la superficie y difusión de vapor en el interior del sólido.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo experimental de este trabajo de tesis se realizaron varias observaciones que permiten recomendar lo siguiente:

1. Realizar mediciones de la porosidad del material para visualizar los fenómenos internos del material.
2. Las hojuelas de avena presentaron contracción durante el secado, por lo que es conveniente tomar fotografías a las hojuelas antes y después de proceso de secado para visualizar su estructura interna y fundamentar los fenómenos internos que ocurren.
3. Medir propiedades como la capacidad calorífica y la conductividad térmica de las hojuelas de avena para conocer como afectan al secado.
4. Realizar mediciones de la temperatura del material en cada una de las charolas, y en diferentes posiciones, y obtener un promedio para utilizarla como temperatura del material, y disminuir el error experimental.
5. Medir la temperatura del bulbo húmedo a la salida del secador y vigilar que se mantenga húmeda la mecha que cubre el termopar.

## **APENDICES**

## APENDICE A. CARACTERISTICAS EN EL SECADOR DE CHAROLAS

### Procedimiento de operación del secador de túnel con charolas.

- Se conecta el secador y se acciona la perilla de temperatura y velocidad de aire.
- Se enciende la computadora y el software de la tarjeta de adquisición en la cual se toman las lecturas del peso y las temperaturas.
- Se regula el flujo de aire y la temperatura de acuerdo a las condiciones de la prueba del experimento a realizar.
- Se colocan los accesorios en el secador ( portacharolas y charolas).
- El equipo se calibra según el peso de las charolas y el portacharolas.
- Una vez calibrado el equipo se sacan las charolas y se coloca la muestra problema cuidando que la distribución sea uniforme y cubra toda el área de cada charola.
- Al terminar de colocar la muestra en las charolas se colocan las charolas en el portacharolas y se activa el sistema de captura de datos obteniendo los tiempos, pesos, temperaturas del bulbo húmedo y seco, y velocidad de flujo hasta que el peso permanezca constante.

### Observaciones en el manejo del secador de túnel de charolas

- No manejar sustancias corrosivas o explosivas en este secador.
- Al cargar las bandejas considerar el peso límite de la balanza (3 000 gr) o la celda de carga (4 540 gr).
- Vigilar periódicamente que la tela del termopar que mide la temperatura del bulbo húmedo se encuentre húmeda.
- El anemómetro de turbina debe ser colocado en la parte media de la salida del aire 30 segundos antes al momento de la lectura.

**APENDICE B. CARACTERISTICAS DEL TERMOANALIZADOR STA-780.****Condiciones específicas técnicas**

Modelo	STA-780
Facilidad	TG-DTG-DTA
Temperatura Máxima	1000 °C
Tamaño de muestra	100 mg
Horno	Nicromo

**Programador de Temperatura.**

Mantiene calor, cierra calor y recicla entre las dos temperaturas presentes. Mantiene enfriamiento, cierra enfriamiento con las temperaturas máximas y mínimas requeridas a más cercanas 1 grado.

**Horno**

Provee enfriamiento con agua, diseñado para dar rápido enfriamiento (35 minutos 1000 °C a 100 °C). No inductivo, con motor impulsado automático, que sube y baja.

**Balanza**

Microbalanza electrónica de 5 g. con microprocesador –unidad base control- Rango de medición eléctrico 0-200 mg/ 0-20 mg.

**Control Atmósfera**

Gas atmosférico estático o flujo, alto o bajo como se requieran todas las partes probadas. Ajustado con medidor de flujo preciso graduado de 0-100%, depende sobre gas particular. La circulación de agua y unidad de enfriamiento con circulación de agua más grande de 30 lt/hr.

**Aire/gas.**

La conexión para líneas para gas esta situada sobre la parte posterior del modulo principal. El flujómetro es graduado en % y no en cm<sup>3</sup>. La máxima lectura de flujo

equivale a  $87 \text{ cm}^3/\text{min}$ , así una velocidad de flujo de  $50 \text{ cm}^3/\text{min}$  es equivalente a 57.5 divisiones.

#### **DC Amplificador.**

Nueve rangos de conexión 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200 y  $500 \mu\text{V}$  para dar 10 mV de salida para el registrador.

#### **Sistema Termopar**

El brazo DTG dispone de un sistema termopar de plato plano de Pt y Pt-RH al 13 %. Hay una muestra positiva y la localización de un contenedor de referencia.

En la figura A.1 se muestran los principales Unidades del Analizador Térmico simultáneo STA 780 que son:

1. Unidad Termobalanza.
2. U.T.P. Temperatura.
3. Unidad control de balanza.
4. Amplificador.
5. Unidad de circulación de agua.

#### **Operación del Termoanalizador STA-780.**

1. Primeramente se encendía la bomba que proporciona agua al equipo
2. Se encendía el regulador que proporcionaba energía a las cuatro unidades restantes.
3. A continuación se encendía la Unidad Termobalanza que contiene el horno, enseguida la unidad U.T.P. Temperatura y después la Unidad Control de Balanza.
4. Se recomienda encender la unidad graficador 30 minutos antes de comenzar el experimento.
5. Se enciende el compresor que proporciona el flujo de aire al sistema.
6. En la unidad programadora de temperatura en donde indica máximo  $^{\circ}\text{C}$  se ajusta a la temperatura deseada, procurando que donde indique mínimo  $^{\circ}\text{C}$  tenga un valor inferior al deseado en máximo  $^{\circ}\text{C}$ .

7. En la Unidad Termobalanza, donde se encuentra el horno, se abre la válvula de dosificación de gas/aire al sistema, ajustando el % de flujo de aire deseado.
8. Una vez que el equipo alcanzó la temperatura y el flujo de aire deseado, se deja un tiempo en estabilizarse, se observa en la Unidad Control de la balanza el peso que marca. Si este peso es superior o inferior a cero con el botón tare y apoyado de los botones fast y slow se ajusta a cero. Se anota el peso que marcaba antes de tarar. Nuevamente se deja estabilizar observando que la temperatura y el flujo de aire no varíen.
9. Se selecciona el Rango y el Span de operación, de acuerdo al peso de la muestra. En la parte posterior de la unidad control de balanza ajustar los botones X1 o X10 y el número 1, 2, 3, 4 o 5 dependiendo las indicaciones para los valores de DTG. Considerar y anotar estas observaciones, porque son las que ayudan a analizarlos resultados en el graficador.
10. En el graficador, se selecciona la velocidad de la carta dependiendo de las condiciones del experimento. Anotar el valor de velocidad de la carta.
11. En la Unidad termobalanza, se baja el horno y con precaución, se coloca la muestra en el soporte de DTG.
12. Una vez colocada la muestra, se acciona el horno subir y al momento de que el horno tope con el soporte superior se acciona el graficador comenzado a captar resultados. Anotar el peso inicial. Observar que no haya variación en el flujo de aire ni en la temperatura.
13. El experimento termina cuando el peso no varía y la curva DTG llegue a cero.
14. Por medio de un sistema de vacío adaptado al termoanalizador, se introduce vacío a la muestra por un espacio de 4 horas sin variar la temperatura, obteniéndose así el peso seco de la hojuela.

### APENDICE C. PARAMETROS DE LOS MODELOS.

A continuación se presentan, las tablas con los valores de los parámetros obtenidos al ajustar los modelos a los datos experimentales

Tabla A.1 Parámetros del modelo exponencial (ecuación 3.17).

Experimento	Parámetro n	Parámetro a	$r^2$
90°C 1.6 m/s	1.925591	0.5051168	0.97139
75°C 1.6 m/s	1.924254	0.2941929	0.98370
60°C 1.6 m/s	1.92857	0.288994	0.99412
45°C 1.6 m/s	2.468498	0.0923286	0.99914
90°C 1.0 m/s	2.244212	0.263068	0.99312
75°C 1.0 m/s	2.302101	0.1838348	0.99655
60°C 1.0 m/s	2.463529	0.134299	0.99838
45°C 1.0 m/s	2.577233	0.066884	0.99783

Tabla A.2 Parámetros del modelo exponencial (réplica)

Experimento	Parámetro n	Parámetro a	$r^2$
90°C 1.6 m/s	2.339165	0.317385	0.995264
75°C 1.6 m/s	2.328434	0.24277	0.99621
60°C 1.6 m/s	2.085592	0.2062638	0.99575
75°C 1.6 m/s	2.251083	0.0959844	0.99784
90°C 1.0 m/s	2.308862	0.229199	0.99237
75°C 1.0 m/s	2.25744	0.2082899	0.99612
60°C 1.0 m/s	2.48326	0.124025	0.99830
45°C 1.0 m/s	2.692263	0.0608795	0.99717

Tabla A.3. Parámetros del modelo suma de exponenciales (ecuación 3.18).

Experimento	Parámetro a	Parámetro b	Parámetro n	$r^2$
90°C y 1.6 m/s	0.57761	1.49215	2.09223	0.99372
75°C y 1.6 m/s	0.41118	1.37236	1.85462	0.9946
60°C y 1.6 m/s	0.39214	1.32773	1.86127	0.99870
45°C y 1.6 m/s	0.12863	1.08855	2.14304	0.99841
90°C y 1.0 m/s	0.41213	1.34599	2.01945	0.99760
75°C y 1.0 m/s	0.26617	1.20181	2.06928	0.99840
60°C y 1.0 m/s	0.17082	1.09225	2.26132	0.99830
45°C y 1.0 m/s	0.09922	1.08155	2.13179	0.99894

Tabla A.4. Parámetros del modelo suma de exponenciales (réplica).

Experimento	Parámetro a	Parámetro b	Parámetro n	$r^2$
90°C y 1.6 m/s	0.55912	1.48954	2.030953	0.99782
75°C y 1.6 m/s	0.390266	1.322416	2.048407	0.99792
60°C y 1.6 m/s	0.281756	1.218805	1.951038	0.99814
45°C y 1.6 m/s	0.135858	1.110195	1.970139	0.99867
90°C y 1.0 m/s	0.350311	1.289325	2.075574	0.99695
75°C y 1.0 m/s	0.291808	1.215812	2.07469	0.99779
60°C y 1.0 m/s	0.172464	1.114885	2.19190	0.99839
45°C y 1.0 m/s	0.094387	1.08399	2.162335	0.9988

Tabla A.5. Parámetros del modelo de difusividad efectiva (ecuación 4.1).

Experimento	Parámetro a	Parámetro b	Parámetro c	Parámetro d	r <sup>2</sup>
90°C 1.6 m/s	164.149	-2.3728	0.343533	0.25301	0.9266
75°C 1.6 m/s	-27579321	-1E9	0.32585	0.4223	0.8267
60°C 1.6 m/s	2.8273	-0.1430	0.004065	0.95041	0.9624
45°C 1.6 m/s	-1E9	-1E9	0.2211	1.596712	0.7374
90°C 1.0 m/s	-12267884	-1E9	0.30074	0.51633	0.8228
75°C 1.0 m/s	-11108100	-1E9	0.330539	0.64317	0.6975
60°C 1.0 m/s	5.194839	-0.11241	-1.48906	58.80724	0.9237
45°C 1.0 m/s	42420708	-1E9	0.100615	2.072344	0.9229

Tabla A.6. Parámetros del modelo de difusividad efectiva (réplica).

Experimento	Parámetro a	Parámetro b	Parámetro c	Parámetro d	r <sup>2</sup>
90°C 1.6 m/s	0.0139839	-2.311E-5	0.0144257	0.0946E-5	0.9343
75°C 1.6 m/s	-30953782	-1E9	0.33483	0.492410	0.7945
60°C 1.6 m/s	-18989886	-1E9	0.37983	0.48726	0.5865
45°C 1.6 m/s	-1E9	-1E9	0.20953	1.50741	0.8569
90°C 1.0 m/s	-8556.634	219.72	0.361264	0.34748	0.954
75°C 1.0 m/s	-1E9	-1E9	0.31793	0.69510	0.8550
60°C 1.0 m/s	3.43237	-0.05140	0.38340	5.73167	0.8669
45°C 1.0 m/s	-1E9	-1E9	-0.013368	2.38766	0.91983

## REFERENCIAS .

Aguerre, R. J., Gabitto, J. F. y Chirife, J., 1985, Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food processes controlled by internal diffusion, *Journal of Food Technology*, Vol.20, pp.623-629.

Ann-Marie, C., 1987, Comparative effects of particle size reduction on structure and water binding properties of several plant fibers, *Journal Food Science*, Vol. 52, No. 6, pp.1595-1599.

Brennan, J. G. y Butters, J. R., 1980, *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*, Editorial Acribia, Zaragoza España.

Ben, N. S. y Perre, P., 1988, Detaillet study of model of heat and mass transfer during convective drying of porous media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 5, pp. 957-967.

Bueno de la Heras, J. L. e Iglesias, H. O., 1993, El secado como operación básica, *Ingeniería Química*, Enero, pp. 201-207.

Chavez-Méndez, C., Salgado-Cervantes, M.A., García-Galindo, H. S. y de la Cruz, M. J., 1995, Modeling of drying curves for some foodstuffs using a kinetic equation of high order, *Drying Technology*, Vol.13, pp. 2113-2122.

Chen, J. Y., Piva, M. y Labuza, T. P., 1984, Evaluation of water binding capacity (WBC) of food fiber sources, *Journal of Food Science* Vol. 49, No. 1, pp.59-63.

Comings, E. W., 1983, Contributions of T. K. Sherwood and associates to the field of drying, *Drying Technology*, Vol.1, pp. 249-273.

Coonce, V.M., Levien, K.L. y Torres, J.A., 1993, Mathematical models for drying rates and quality indicator changes during barley malt kilning, *Cereal Foods World*, Vol. 38, No. 11, pp. 822-830.

Chang, P. R. y Sosulski, F. W., 1985, Functional properties of dry milled fractions from wild oats (*Avena fatua* L.), *Journal of Food Science*, Vol. 50, No.5, pp. 1143-1157.

Desrosier, N. W., 1983, *Elementos de tecnología de los alimentos*, Avi publishing company, Editorial C.E.C.S.A.

Dietl, C., George, O.P. y Bansal, N.F., 1995, Modelling of diffusion in capillary porous materials during the drying process, *Drying Technology*, Vol.13, pp. 267-293.

Fortes, M. y Okos, M. R., 1981, Heat and mass transfer in hygroscopic capillary extruded products, *AIChE Journal*, Vol. 27, No. 2, pp. 255-262.

Geankoplis, C. J., 1995, *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, Editorial CECSA, Segunda edición.

Karathanos, V. T., Villalobos, G. y Saravacos, G. D., 1990, Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data, *Journal of Food Science*, Vol. 55, No.1, pp.218-223.

Key, R.B. y Suzuki, M., 1974, On the characteristic drying curve, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol.17, pp.1455-1464.

Kent, N.L., 1971, *Tecnología de los cereales*, Editorial Acribia, Zaragoza España.

Ketelaars, A.J., Pel, L., Coumans, W.J. y Kerkhof, P. J., 1995, Drying kinetics: a comparison of diffusion coefficients from moisture concentration profiles and drying curves, *Chemical Engineering Science*, Vol. 50, No. 7, pp. 1187-1191.

Kisakurek, B. y Gebizlioglu, O., 1978, Capillary mechanism in drying, 1er. Int. Symp. in Drying.

Marousis, S. N. y Savavacos, G. D., 1990, Density and porosity in drying starch materials, *Journal Food Science* Vol. 55, No. 5, pp.1367-1372.

Morgan, R. P. y Yerazunis, S., 1967, Heat and mass transfer between an evaporative interface in a porous medium and external gas stream, *A.I.Ch.E. Journal*, Vol 13, No.1, pp. 132.

Mulet, A., Berna, A., Borrás, M. y Piñaga, F., 1987, Effect of air flow rate on carrot drying, *Drying Technology*, Vol.5, pp. 245-248.

Necati, O. M., 1980, *Heat transfer a basic approach*, Second edition, Ed. McGraw Hill International Editions, Singapore.

Ocon, G. J. y Tojo, B., 1970, *Problemas de ingeniería química*, Tomo II, Editorial Aguilar, Zaragoza España.

Papadakis, S. E., Bahu, R. E. y Mckenzie, K. A., 1993, Correlations for the equilibrium moisture content of solids, *Drying Technology*, Vol. 11, pp. 543-553.

Perry, 1992, *Manual del ingeniero químico*, Sexta edición, Ed. McGraw Hill.

Ratti, C. y Crapiste, H., 1995, Determination of heat transfer coefficients during drying of foodstuffs, *Journal of Food Process Engineering*, Vol.18, pp. 41-53.

СИМОНОВ, И. К. y ЛЫСЕНКО, В. П., 1967, EQUATIONS OF DRYING CURVES, INT. J. HEAT MASS Transfer., Vol. 32, No. 5, pp. 837-841.

Stanley, E. y Charm, D., 1971, The fundamentals of food engineering, Editorial The Avi Publishing Company Inc ., London England.

Tolaba, M. P. y Viollaz, P. E., 1988, A mathematical model to predict the temperature of maize kernels during drying., J. Food Eng. 8:1.

Vaccarezza, L.M., Lombardi, J. L. y Chirife, J., 1974, Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root, J. Fd Technol, Vol. 9, pp. 317-327.

Whitaker, S. y William, T., 1977, Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media. A theory of drying porous media, Adv. Heat Transfer., Vol.13, pp.119-200.

Whitaker, S., William, T. y Chou, H., 1983, Drying granular porous media -theory and experiment, Drying Technology, Vol.1, pp. 3-33.

Yener, E. y Urgan, M., 1987, Drying behavior of honey-starch mixtures, Journal Food Science, Vol. 52, No: 4, pp.1054-1058.