

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD: IZTAPALAPA

CARRERA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA

TÍTULO DE TESIS:

**APLICACIÓN DEL LECHO FLUIDIZADO AL
ACONDICIONAMIENTO DEL MAÍZ: SECADO Y
DESINFESTACIÓN**

FECHA: 5 DE JUNIO DE 1985

ALUMNO: MENDOZA MARTÍNEZ ANA MARÍA

MATRÍCULA: 82365904

ASESORES:

**DR. MARIO G. VIZCARRA MENDOZA
DR. E. JAIME VERNON CARTER**

"APLICACION DEL LECHO FLUIDIZADO AL ACONDICIONAMIENTO DEL MAIZ: SECADO Y DESINFESTACION".

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS PRESENTA: ANA MARIA MENDOZA MARTINEZ.

MEXICO, D.F

1985

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA.

CIENCIAS BASICAS E INGENIERIA.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE PROCESOS E HIDRAULICA.

AREA DE INGENIERIA QUIMICA.

" APLICACION DEL LECHO FLUIDIZADO AL ACONDICIONAMIENTO
DEL MAIZ: SECADO Y DESINFESTACION".

T E S I S
que para obtener el grado
de Maestro en Ciencias
P R E S E N T A :
ANA MARIA MENDOZA MARTINEZ.

México. D.F. 1985.

A MIS PADRES Y A MIS HERMANOS, por el amor
y el apoyo que me brindaron.

A MIS AMIGOS, por su compañía.

Y A MI.

Quiero hacer patente mi agradecimiento a los Drs.
Mario Gonzalo Vizcarra Mendoza y Eduardo Jaime Vernon
Carter, quienes con su apoyo hicieron posible la rea-
lización de este trabajo de tesis.

Quiero agradecer al Dr. Jorge B. García Peña y al M.en C.
Eduardo González Hernández su asesoría.

I N D I C E .

	Pág.
NOMECLATURA.	I
INDICE DE TABLAS.	IV
INDICE DE FIGURAS.	VII
INTRODUCCION.	1
CAPITULO 1.	
M A R C O T E O R I C O .	5
1.1.- CARACTER DEL AGUA DE LOS ALIMENTOS.	5
1.2.- ISOTERMAS DE SORCION.	5
1.3.- SEPARACION.	6
1.3.1.- Características del lecho fluidizado.	7
1.3.2.- Velocidad de separación.	10
1.4.- FUNDAMENTOS DE SECADO.	11
1.4.1.- Período inicial.	12
1.4.2.- Período de velocidad constante de secado.	12
1.4.3.- Período de velocidad decreciente de <u>seca</u> do. Modelo de difusión molecular.	15
CAPITULO 2.	
M E T O D O L O G I A .	24
2.1.- MATERIALES.	24
2.2.- DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS EXPERIMENTALES UTILIZADOS.	24
2.2.1.- Celdas de medición de actividad acuosa.	24

2.2.2.- Lecho fluidizado.	25
2.3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	28
2.3.1.- Caracterización física e hidrodinámica del maíz.	28
2.3.2.- Elección de los límites de los parámetros estudiados.	30
2.3.3.- Isotermas de desorción.	31
2.3.4.- Secado.	31
2.3.5.- Evaluación del grado de desinfestación.	33

CAPITULO 3.

P R E S E N T A C I O N Y D I S C U S I O N D E R E S U L T A D O S .	37
--	----

3.1.- CARACTERIZACION FISICA E HIDRODINAMICA DEL MAIZ.	37
3.2.- ISOTERMAS DE DESORCION.	40
3.3.- SECADO.	40
3.4.- EVALUACION DEL GRADO DE DESINFESTACION.	67

C O N C L U S I O N E S Y R E C O M E N D A C I O N E S .	84
---	----

APENDICE A.

Curva de calibración para aire del medidor de flujo	87
Carta psicrométrica.	88
Datos primarios para la construcción de la Fig.5.	89

APENDICE B.

Entomología.	90
Método macro-Kjeldahl para determinación de proteína cruda.	92
Determinación de carbohidratos totales por antrona.	97
Curva de calibración para determinación de carbohidratos totales disponibles por antrona.	100
APENDICE C.	
Datos primarios para construcción de isoterma.	101
Datos primarios y calculados para las diferentes condiciones de operación.	102
Resultados de los análisis bromatológicos.	117
APENDICE D.	
Secuencia de cálculo para el coeficiente de transferencia de masa y calor en los casos en que se presenta período constante de secado.	118
Secuencia de cálculo para el coeficiente de difusión y análisis de las geometrías estudiadas para el modelo.	120
BIBLIOGRAFIA .	125

N O M E N C L A T U R A .

- a : Area de transferencia por unidad de longitud de lecho fluidizado (cm^2/cm).
- A : Area de transferencia por unidad de volumen de lecho fluidizado (cm^2/cm^3).
- Ae : Area de la esfera equivalente a un grano de maíz (cm^2).
- Ap : Area del paralelepípedo equivalente a un grano de maíz (cm^2).
- A_t : Area transversal del secador (cm^2).
- Aw : Actividad acuosa del maíz (g.H₂O /g. s.s.)
- C : Concentración de insectos en el lecho fluidizado (g.de insectos en el lecho / g. de insectos iniciales).
- Co : Concentración inicial de insectos en el lecho fluidizado.
- Cpg : Capacidad calorífica del aire (cal/g°C).
- dpe : Diámetro equivalente de partícula (cm).
- Dm : Coeficiente de difusión molecular promedio (cm^2/min)
- Dm_e : Coeficiente de difusión molecular promedio para geometría esférica (m^2/hr).
- Dm_p : Coeficiente de difusión molecular promedio para el paralelepípedo (m^2/hr).
- E : Energía de activación del sistema (cal/g mol).
- h : Coeficiente de transferencia de calor (cal/min $\text{cm}^2\text{°C}$).
- H : Contenido de humedad en el sólido (g.H₂O/ g de s.s.)
- \bar{H} : Contenido de humedad promedio en el sólido (gH₂O/g s.s.).
- Ho : Contenido inicial de humedad en el sólido (g H₂O/g s.s.).
- He : Contenido de humedad en el equilibrio en el sólido (g H₂O / g s.s.).
- $\chi_{b.h.}$: Humedad del aire a condiciones de tb.h. (g H₂O/g a.s.).
- χ : Humedad del aire a la salida (g H₂O / g. a.s.).
- H₌ : Humedad final del sólido (g H₂O / g s.s.).

II

- k' : Coeficiente de transferencia de masa en la superficie de la partícula (cm/min).
 k_m : Coeficiente de transferencia de masa (cm/min).
 K : Constante de velocidad de separación (min^{-1}).
 L : Altura estática del lecho (cm).
 L_f : Altura del lecho fluidizado (cm).
 \mathcal{L} : Calor latente de vaporización del agua (cal/g).
 M : Constante de la ecuación tipo Arrhenius.
 P_1 : Presión en la línea del sistema (lb/plg²).
 Q : Gasto de aire a través del lecho fluidizado (l/min).
 R : Radio de la partícula (cm).
 r : Distancia radial del centro a la superficie de la partícula (cm).
 t b.h. : Temperatura de bulbo húmedo (°C).
 t b.s. : Temperatura de bulbo seco (°C).
 T : Temperatura del sistema (°C).
 T_e : Temperatura de alimentación del aire (°C).
 U_f : Velocidad de fluidización (cm/seg).
 U_{mf} : Velocidad mínima de fluidización (cm/seg).
 U_o : Velocidad superficial del aire (cm/seg).
 V_e : Volumen de la esfera equivalente a un grano de maíz (cm³).
 V_p : Volumen del paralelepípedo equivalente a un grano de maíz (cm³).
 W : Peso de la carga de maíz que se fluidiza (g).
 ρ_g : Densidad del aire (g/cm³).
 ρ_s : Densidad de partícula (g/cm³).
 ρ_a : Densidad aparente del maíz (g/cm³).
 ρ_e : Densidad empacada (g/cm³).
 ϵ_{mf} : Fracción de vacío en el lecho a condiciones de velocidad mínima de fluidización (adimensional).

- ϵ_e : Fracción de vacío en el lecho empacado(adimensional).
- ϕ_s : Esfericidad de la partícula(adimensional).
- μ : Viscosidad del aire (g/cm-seg).
- θ : Tiempo que dura la operación de secado(min).
- ΔP_T : Caída de presión total en el lecho fluidizado (g/cm^2).
- ΔP_d : Caída de presión debida al plato distribuidor(g/cm^2).
- ΔP_L : Caída de presión a través del lecho fluidizado(g/cm^2).

INDICE DE TABLAS.

	Pág.
Tabla 1.- Máximo contenido de humedad permisible para el almacenamiento seguro de diversos productos básicos.	8
Tabla 2.- Relaciones entre los valores de los parámetros estudiados durante la operación de secado.	32
Tabla 3.- Relaciones de temperatura de entrada y humedad final a la que se trataron 3 muestras de maíz infestadas, a una velocidad de fluidización constante, $U_f=240$ cm/seg.	35
Tabla 4.- Características físicas del maíz.	37
Tabla 5.- Determinación de d_{pe} y ρ_s .	38
Tabla 6.- Valores de los coeficientes de transferencia de calor y masa para las diferentes condiciones que presentan período constante de secado.	45
Tabla 7.- Valores de los coeficientes de difusión a las diferentes condiciones. $T_e=30^\circ\text{C}$. Para las dos geometrías estudiadas.	58
Tabla 8.- Valores de los coeficientes de difu	

si3n a las diferentes temperaturas. 65

Tabla 9.- Fracciones en peso de los diferentes
da3os causados al ma3z para distintos
per3odos de almacenamiento para el -
ma3z sin tratamiento. 74

Tabla 10 a

13.- Fracciones en peso de los diferentes
da3os causados al ma3z para los dis-
tintos per3odos de almacenamiento pa
los diferentes tratamientos realiza-
dos al ma3z. 75

APENDICE A.

Tabla 1.- Datos de log de la velocidad superfi-
cial vs. log de la ca3da de presi3n
en el lecho utilizados para la cons-
trucci3n de la Fig.5.L/D=1.0, $T_e=23^\circ\text{C}$,
 $P_1=45 \text{ lb/plg}^2$. 89

APENDICE C.

Tabla 1.- Datos primarios para la construcci3n
de la Fig.6. 101

Tabla 2 a

20.- Datos primarios obtenidos para las
diferentes condiciones de opera-
ci3n. 102

Tabla 21.

a 25.- Datos calculados de la humedad reducida utilizados para la construcción de las Figs. 16 a 20. 112

Tabla 26.- Datos de porcentaje de proteína cruda y carbohidratos totales disponibles con respecto al tiempo de almacenamiento para los diferentes tratamientos. A partir de estos datos se construyeron las Figs. 22 y 23. 117

APENDICE D.

Tabla 1.- Datos de velocidad de secado obtenidos a partir de las figuras correspondientes. 119

Tabla 2.- Datos de λ correspondientes a un Bi. 124

VIII

- Fig.21.- Variación del coeficiente de difusión con la temperatura. Ecuación tipo Arrhenius:- experimental y teórica. 68
- Fig.22.- Variación del contenido de carbohidratos totales disponibles con respecto al tiempo(datos en base seca). 70
- Fig.23.- Variación del contenido de proteína cruda con respecto al tiempo de almacenamiento (datos en base seca). 72
- Fig.24.- Porcentaje de maíz no picado(sano), con respecto al período de almacenamiento(datos en base seca). 80
- Fig.25.- Porcentaje de maíz dañado por hongos con respecto al período de almacenamiento(en base seca). 81
- Fig.26.- Porcentaje de maíz picado con respecto al período de almacenamiento (en base seca). 83

APENDICE A.

- Fig.1.- Curva de calibración para aire del medidor de flujo. 87
- Fig.2.- Carta psicrométrica. 88

APENDICE B.

Fig.B.1.- Curva de calibración para determinación
de carbohidratos totales disponibles. 100

APENDICE D.

Fig.1.- Curva de comparación de los casos estudiados
para el modelo. $L/D=1.0$, $U_f=240$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$. 121

Fig.2.- Curva de comparación para el modelo de difu
sión para el paralelepípedo y la esfera. 122

I N T R O D U C C I O N .

I N T R O D U C C I O N .

En esta sección se hace un análisis de la magnitud del problema de la preservación de granos, y se plantea la utilización de la tecnología de los sistemas de lecho fluidizado como una herramienta para combatirlo.

En el mundo entero, los cereales constituyen la fuente más importante de energía⁽¹⁾, y son el alimento básico en muchos pueblos.

En México, el maíz es el cereal de mayor importancia, y representa el 52.7% de la producción agrícola y ocupa el 54.77% de la superficie destinada a la agricultura.

Se calcula que de la producción total de maíz, el 81% se destina al consumo humano, el 15 % a forraje y el 4% restante se transforma en almidones, glucosa, dextrinas y otros derivados⁽²⁾.

En 1982, la producción nacional de maíz fué de 15.3 millones de toneladas⁽³⁾, de las cuales se calcula que un 60% se destinó al consumo comercial y el 40 % restante al autoconsumo. El primero corresponde a la elaboración de tortillas, harina, derivados y comercialización al menudeo; el segundo corresponde a lo que el productor conserva para el consumo de su familia, sus animales y la semilla para el siguiente período de siembra.

De los 9.2 millones de toneladas de maíz destinadas a la comercialización. 5.52 toneladas fueron absorbidas por la Compañía Nacional de Subsistencias Populares (CONASUPO), las que con subsidio gubernamental se distribuyeron de la siguiente manera: 60% fueron consumidos por los molinos de nixtamal, 25 % se industrializaron por las compañías harineras y el 15 % restante se destinó a ventas al menudeo a través de la Distribuidora CONASUPO, S.A. (DICONSA) y la Coordinación General del Plan Nacional de Zonas Deprimidas y Grupos Marginados (COPLAMAR).

El logro de una disponibilidad adecuada de los alimentos exige no sólo una producción suficiente de los mismos, sino también su conservación. La preservación de los cereales es una actividad que día a día adquiere mayor importancia. Una de las mayores dificultades que enfrenta son las pérdidas por la infestación de insectos durante el almacenamiento⁽⁴⁾.

El daño que el insecto ocasiona al grano⁽⁴⁾ consiste esencialmente en la destrucción por consumo del mismo, además de los desperdicios biológicos que lo contaminan.

Un muestreo realizado en la mesa central y en la región tropical de México⁽⁵⁾ arrojó los siguientes resultados: de 28 mazorcas analizadas, para la especie "Maíz criollo", el 71 % estaba infestada, mientras que para el caso de la especie "Maíz H-503", el 75 % estaba infestada. Otra fuente de pérdida en la calidad nutricional de los granos es la relacionada con el almacenamiento de éstos con altos contenidos de humedad, lo cual favorece el desarrollo de hongos y otros microorganismos indeseables, lo que trae como consecuencia, una pérdida considerable en su valor comercial, peso y valor biológico.

Efectivamente se ha podido demostrar que a determinados contenidos de humedad en el maíz almacenado, se favorece el crecimiento de insectos, bacterias, hongos y ácaros, en los siguientes niveles: de 10 a 12 % (b.s.) crecen los insectos, entre un 13 y 16 % (b.s.) se desarrollan hongos y ácaros, y desde un 25 % aparecen las bacterias. Cabe señalar además, que entre un 30 y 36 % el contenido de humedad es tal que provoca la germinación de la semilla.

Por lo anterior, se recomienda que en el caso de cultivos cuyo grano se va a almacenar, éste se seque y desinfeste antes de ser introducido a los silos, ya que se debe tener presente que los insectos se reproducen con suma rapidez, llegando a presentarse varias generaciones en un sólo período de almacenamiento. Se ha encontrado

que el insecto completa su ciclo biológico en aproximadamente un mes⁽⁶⁾.

La Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) estima que en países subdesarrollados, el deterioro por parásitos y enfermedades en el grano, disminuye en más del 30 % el volumen aprovechable de los mismo.

Tomando en cuenta la importancia que el maíz tiene en México como alimento básico, y dadas las malas condiciones en que suele almacenarse⁽⁷⁾, es importante el desarrollo de un método de acondicionamiento previo, el cual consista en secar y desinfestar al grano en forma simultánea, para así disminuir el daño que se le pueda ocasionar durante el almacenamiento.

Debido a los altos coeficientes de transferencia de masa y calor que se alcanzan en los sistemas de lecho fluidizado y a las características hidrodinámicas que estos sistemas imprimen al sólido, podemos pensar que esta tecnología presenta ventajas muy importantes en su aplicación al secado y desinfestación de granos. Efectivamente, Dermott y Evans⁽⁸⁾ realizaron una evaluación de un lecho fluidizado aplicado a la desinfestación de trigo. El rango de temperatura estudiado fué entre 60 y 80 °C, además de que analizaron la mortalidad de S. oryzae, R. dominica y S. cerealella en función del tiempo de contacto entre el sólido y el gas. Encontraron que las especies fueron esencialmente desinfestadas, y que no se alteró la calidad del trigo a causa del tratamiento térmico. Asimismo, obtuvieron un modelo que describe una hipérbola, para relacionar los parámetros estudiados (mortalidad en función de la temperatura y el tiempo de exposición).

La finalidad de este trabajo es el estudio experimental de los procesos de secado y desinfestación del maíz en un lecho fluidizado intermitente.

A continuación se presenta el marco teórico en que se basó el

presente estudio, una descripción del aparato que se usó para llevar a cabo las experimentaciones y finalmente, se tratan y analizan los resultados obtenidos, con el fin de determinar la aplicabilidad del lecho fluidizado en el acondicionamiento del maíz.

C A P I T U L O 1 .

1.- MARCO TEORICO .

1.1.- CARACTER DEL AGUA DE LOS ALIMENTOS.

Cuando se hace referencia al contenido de humedad de los alimentos, ello implica que el alimento está constituido por materia-seca más cierta cantidad de agua. Este es un concepto muy útil para fines prácticos, pero que deja de tomar en cuenta el hecho de que el agua que está presente puede existir como parte integrante del alimento en sí. Se pueden distinguir, cuando menos, cuatro tipos - de agua asociada a alimentos: agua capilar, agua en solución, agua adsorbida y agua de composición⁽⁹⁾.

Agua capilar. Esta es el agua que está retenida en la finísima red de espacios capilares extracelulares que se encuentran en el tejido de los alimentos de muchas especies, y cabe compararlo con el agua contenida entre diminutas partículas del suelo.

Agua en solución. La mayoría de los alimentos contienen muchos factores constitutivos solubles en agua, tales como azúcares, sales minerales, ácidos orgánicos y algunas vitaminas. Estos factores forman en el alimento una solución más o menos concentrada según sea la cantidad presente de humedad.

Agua adsorbida. Hubo una época en la que se consideró que el agua asociada a materias nutricionales con bajo contenido de humedad se adsorbía en la superficie del alimento. Actualmente se sugiere que esta agua adsorbida no forma, en el estado de capa monomolecular, una capa continua e ininterrumpida, sino que cada una de las moléculas de agua está retenida por fuerzas químicas a uno de los muchos agrupamientos químicos reactivos que presenta la "superficie" de las proyecciones de los polímeros de carbohidratos, con lo que

la capa monomolecular representa un estado en el que todos estos agrupamientos están ligados a una molécula de agua. Al igual que sucede con las materias inorgánicas, pueden formarse encima de la capa monomolecular, capas sucesivas de moléculas de agua en torno de los polímeros constitutivos del alimento, y estas otras capas estarán retenidas por fuerzas progresivamente más débiles, hasta que las capas más externas quedan retenidas por fuerzas no mucho mayores que las de atracción capilar.

Agua de composición. Esta agua cabe definirla como la que se encuentra combinada en una unión química, con los factores constitutivos del alimento. Las proteínas presentes en muchos alimentos contienen gran parte de esta agua de composición y, cuando se elimina esta agua, sufren cambios irreversibles en sus propiedades.

1.2.- ISOTERMAS DE SORCION.

En el estudio de la deshidratación de alimentos, el contenido de humedad presente en ellos es un factor importante, tanto en el procesamiento como en la estabilidad posterior del producto seco durante su almacenamiento. La humedad relativa de equilibrio de una materia alimenticia está dada en función de su contenido de humedad y de su composición a base de proteínas, carbohidratos, sales, minerales y otros constituyentes solubles en agua. En la literatura que trata del tema de la humedad de los alimentos se ha empleado con frecuencia la expresión de actividad acuosa y se le puede definir como la humedad relativa expresada en forma de fracción decimal. Esta expresión tiene la ventaja de que comunica la idea de que la humedad del alimento es menos "activa" que el agua libre. Es de considerable interés, por lo tanto, el examinar cómo varía el contenido de humedad del alimento; generalmente esta variación se expresa gráficamente en forma de una curva, que relaciona el contenido de hume

dad en el alimento con la humedad relativa del aire en contacto con él, por lo que, dicha curva es la expresión de las condiciones de equilibrio entre la humedad del alimento y la humedad en el aire a una temperatura dada cualquiera.

Un rasgo característico de estas curvas, es que presentan el fenómeno de histéresis⁽¹¹⁾, es decir, que el contenido de equilibrio puede tener dos valores, uno de ellos correspondiente al material que adsorbe agua, y otro correspondiente al material que se está desorbiendo. Por lo tanto, es importante que, cuando se mencionan datos de sorción se indique si el material está adsorbiendo o desorbiendo agua.

En los problemas de deshidratación de cosechas o de materias alimenticias, la isoterma de desorción adquiere importancia y se utiliza para fines de cálculo.

En la Tabla 1 se han enumerado los valores de máximo contenido de humedad permisible para el almacenamiento seguro de cierto número de alimentos distintos. Como resultado de diferencias de variedad u origen pueden producirse pequeñas variaciones de estos valores. El máximo contenido seguro de humedad permisible depende, en cierto grado, de la temperatura de almacenamiento.

1.3.- SEPARACION.

1.3.1.- Características del lecho fluidizado.

La fluidización se puede describir como una operación en la que el lecho de partículas sólidas adquiere las propiedades de un fluido. Consiste en hacer pasar un gas a través de un lecho de sólidos a un gasto suficientemente alto para que las partículas queden suspendidas.

La fluidización sigue el mecanismo que a continuación se describe⁽¹²⁾ :

Producto básico.	Máximo contenido de humedad permisible (% b.s.).
Trigo	13.5
Trigo bulgur	13.5
Maíz	13.5
Sorgo	16.0
Arroz cáscara	14.0
Arroz pulido	13.0
Frijol	15.0
Guisante verde	14.0
Uvas pasas sin semilla	20.0
Uvas pasas	20.0
Albaricoque seco	20.0
Melocotón seco	18.0
Ciruelas	21.0
Dátiles	24.0

Tabla 1.- Máximo contenido de humedad permisible para el almacenamiento seguro de diversos productos básicos (contenido de humedad en equilibrio con una humedad relativa del 70 %, a aproximadamente 27 °C)⁽⁶⁾.

al inicio de la operación y durante un cierto intervalo de velocidades superficiales de aire, se mantiene la condición de lecho fijo por lo cual hay un aumento en la caída de presión con la velocidad. La relación entre estos dos parámetros se mantiene prácticamente li neal debido a la falta de movimiento de las partículas.

Al seguir aumentando el gasto, se presenta un aumento súbito - en la caída de presión, debido a que la fuerza estática presentada por el lecho es vencida por la fuerza que ejerce el fluido. En esta zona se localiza la velocidad mínima de fluidización.

Ya en la región de fluidización, la caída de presión a través del lecho se mantiene prácticamente constante, durante un cierto in tervalo de velocidades del fluido. Esto es, las partículas se encuentran suspendidas y ejercen una resistencia constante al paso del - fluido.

El movimiento continuo de las partículas produce además una es tratificación conforme aumenta la velocidad del fluido y se acerca a la zona de transporte neumático de sólidos. Esta es tratificación consiste en que las partículas más ligeras (menor tamaño, menor den sidad) se localizan en la parte superior del lecho y las más pesadas (mayor tamaño, mayor densidad) se encuentran en la parte inferior - del mismo.

Por último, a velocidades mayores, se produce el transporte neu mático. En esta zona de iniciación de arrastre de sólidos, la velo cidad a la que se presenta tal fenómeno se le llama velocidad terminal. Este fenómeno se manifiesta en el momento en que las partículas más ligeras empiezan a ser arrastradas fuera del secador. Como resul tado de este transporte, la caída de presión disminuye en respuesta a la disminución de la carga en el lecho. Por esta razón, el transporte neumático de sólidos puede ser aprovechado en la separación o arrastre de partículas de diferentes densidades y/o tamaños.

La siguiente relación explica la influencia de diversos facto-

res físicos sobre la velocidad mínima de fluidización para partículas esféricas⁽¹³⁾:

$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu} \right)^2 + \frac{150 (1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad \dots(1.1)$$

1.3.2.- Velocidad de separación.

El arrastre o transporte de partículas ligeras con respecto al tiempo puede ser explicado mediante la siguiente expresión⁽¹⁴⁾:

$$C = C_0 \exp (-K \theta) \quad \dots(1.2)$$

Esta relación es válida en un amplio intervalo de concentraciones de partículas ligeras a una velocidad superficial constante del aire. De acuerdo con este mecanismo, el lecho está parcialmente estratificado al inicio de la operación. Posteriormente, la parte superior del lecho se enriquece de partículas más ligeras, provocando su arrastre. Al final de la separación se observa que el arrastre de sólidos es más difícil debido a que, a estas alturas, el lecho está constituido únicamente por partículas más pesadas.

das.

Mediante el modelo presentado es posible calcular tiempos de separación en sistemas de dos componentes cuando se mantienen constantes los parámetros con que se determinó la constante de velocidad de separación.

1.4.- FUNDAMENTOS DE SECADO.

El secado de sólidos se puede entender como una operación en la cual el sólido húmedo, expuesto a una corriente de gas de bajo contenido de humedad, durante un cierto período de tiempo, pierde humedad constantemente hasta llegar al equilibrio. Es decir, si las condiciones de la corriente de gas no cambian, se establecerá un equilibrio entre el contenido de humedad del sólido y la presión parcial del vapor en el gas⁽¹³⁾.

Es indudable que en la industria existen infinidad de secadores⁽¹⁵⁾ los cuales en general pueden clasificarse, de acuerdo a la forma como se suministra calor al sólido húmedo, en: secadores directos o por convección y secadores indirectos o por conducción. Estos a su vez pueden dividirse en continuos e intermitentes.

Los secadores directos son aquellos en los que la transferencia de calor se lleva a cabo por contacto directo entre el sólido húmedo y el gas caliente y/o seco, arrastrándose el líquido evaporado en el mismo. En los secadores indirectos, el calor se transfiere al sólido húmedo a través de la superficie que lo contiene y el líquido evaporado se remueve independientemente del medio de calentamiento.

El secador de lecho fluidizado en general, presenta las características de los dos tipos de secadores antes mencionados, ya que el sólido húmedo recibe calor directamente del gas caliente (convección) y además, al ponerse en contacto con la pared del recipiente y con el plato distribuidor también recibe calor.

Durante la deshidratación de sólidos tienen lugar simultáneamente la transferencia de masa y calor, tanto del interior del material como en la interfase sólido-gas, debido principalmente a la existencia de gradientes de temperatura y concentración de agua entre el material húmedo y el gas con un bajo contenido de humedad. Las velocidades de transferencia dependen de la magnitud de estos gradientes, así como también del área de transferencia y de los coeficientes de transporte externos.

Un proceso típico de secado de sólidos porosos, presenta los siguientes períodos⁽¹⁶⁾:

- 1.- Período inicial.
- 2.- Período de velocidad constante de secado.
- 3.- Período de velocidad decreciente de secado.

1.4.1.- Período inicial.

Es una etapa de estabilización que termina cuando la superficie del sólido saturado llega a la temperatura de bulbo húmedo del gas. Después, tanto la temperatura como la velocidad de secado permanecen constantes durante un cierto intervalo de tiempo. Debido a que es difícil tener control sobre la historia previa del sólido que se va a secar, este período no es fácilmente reproducible y por lo tanto resulta complicado su modelamiento matemático.

1.4.2.- Período de velocidad constante de secado.

Durante esta etapa, la superficie externa del sólido se encuentra saturada con el líquido y la transferencia de calor y masa ocurre entre la superficie y el gas, manteniéndose constantes las propiedades de este último. Esta etapa termina cuando se alcanza el contenido crítico de humedad en el sólido. En este punto, el movi-

miento del líquido hacia la superficie externa del sólido no es lo suficientemente rápido para reemplazar al líquido que se está evaporando, apareciendo por consiguiente, las primeras zonas de superficie no saturada en el sólido. Debido a esto se puede decir que, el contenido crítico de humedad dependerá de las propiedades del sólido y de las condiciones externas que se establezcan. En este período, el área de transferencia de masa y calor debe permanecer constante y se pueden plantear los siguientes balances de masa y energía:

Balance de masa:

$$-\rho_s \frac{dH}{d\theta} = km A (\chi_{b.h.} - \chi) \rho_g \quad \dots(1.3)$$

Balance de energía:

$$-\rho_s \frac{dH}{d\theta} = \frac{h A}{L} (t_{b.s.} - t_{b.h.}) \quad \dots(1.4)$$

Para el cálculo del área de transferencia de masa y calor se emplea la relación propuesta por Heertjes⁽¹⁷⁾:

$$a = \frac{6 W}{\rho_s d p e L_f} \quad \dots(1.5)$$

Si esta área es multiplicada por el inverso del área transversal del secador, se obtendrá un área de transferencia por unidad de

volumen de lecho fluidizado.

$$A = \frac{a}{A_t} \quad \dots(1.6)$$

En el caso de sólidos porosos con tamaño de partícula muy pequeño y lo suficientemente húmedo como para que exista humedad libre, las condiciones de equilibrio para transferencia de masa y calor se alcanzan relativamente rápido, de tal manera que el lecho fluidizado y el aire que sale se encuentran próximos a la temperatura de saturación adiabática de la corriente que entra al secador⁽¹³⁾.

El cambio en el contenido de humedad de las partículas en función del tiempo en un lecho fluidizado, se conoce mediante el siguiente balance:

calor perdido por el aire que entra. = calor transferido a los sólidos para evaporar al líquido.

$$A_t \rho_g C_{pg} U_{\text{ef}} (T_e - t \text{ b.h.}) d\theta = -A_t \rho_s L (1 - \epsilon_e) dH \quad \dots(1.7)$$

con la condición inicial:

$$\theta = 0, \quad H = H_0$$

la ecuación queda:

$$\frac{d\theta}{dH} = \frac{\rho_g C_{pg} U_{\text{ef}} (T_e - t \text{ b.h.})}{\rho_s L (1 - \epsilon_e)} \quad (1.8)$$

En esta ecuación se puede observar que la variación de la humedad en el lecho es proporcional a la velocidad superficial del aire e inversamente proporcional a la altura estática del lecho.

En nuestro caso no es posible utilizar esta relación, ya que el grano, aunque es sumamente poroso, su tamaño de partícula es muy grande (6.0 mm), y dicha relación sólo es válida para $d_{pe} \leq 1.0$ mm.

1.4.3.- Período de velocidad decreciente de secado.

Una vez que se ha alcanzado el contenido crítico de humedad en el sólido, se inicia un nuevo período de secado, el cual se caracteriza por un decrecimiento de la velocidad de secado en función del tiempo. Durante este período, el líquido es removido desde el interior del sólido hasta alcanzar el contenido de humedad en el equilibrio.

A continuación se citan algunos posibles mecanismos que describen este período:

- a).- Difusión del líquido debida a la existencia de un gradiente de concentración. Ley de Fick de difusión.
- b).- Movimiento del líquido por fuerzas de capilaridad.
- c).- Difusión superficial en capas de líquido adsorbidas en las interfaces del sólido.
- d).- Flujo provocado por un encogimiento y gradientes de presión.

De éstos, el que mejor ha descrito el movimiento del agua en el interior de los alimentos sólidos es el mecanismo de difusión molecular del líquido⁽¹⁸⁾.

Considerando que el sólido (maíz) es isotrópico, tiene geometría esférica y que todo el proceso de velocidad decreciente de secado está controlado por el mecanismo de difusión de acuerdo a la ley de Fick con coeficiente efectivo de difusión constante, podemos escribir un balance de masa en un elemento de volumen de capa esférica de espesor igual a Δr (Fig.1).

Si la velocidad neta de difusión en el elemento es igual a la velocidad de acumulación de humedad dentro del elemento.

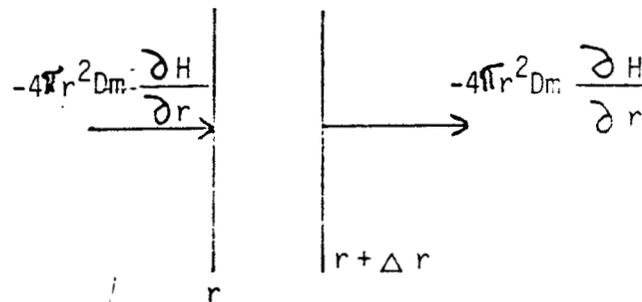
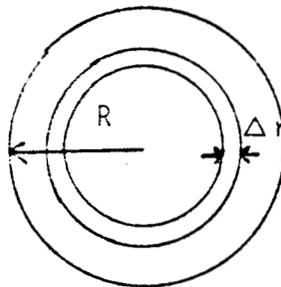


Fig.1.- Elemento de volumen de capa esférica de espesor Δr .

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = D_m \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \quad \dots(1.12)$$

La solución de esta ecuación dependerá de las condiciones de frontera que se establezcan. Para los fines de este estudio, se han contemplado los siguientes dos casos:

Caso 1.- Resistencias externas despreciables.

a).- El contenido inicial de humedad de la muestra es homogéneo - (condición inicial):

$$U = (H_o - H_e) r ; \forall r; \theta = 0 \quad \dots(1.13)$$

b).- El contenido final de humedad es homogéneo e igual al contenido de humedad en el equilibrio:

$$U = 0, \quad r; \theta \longrightarrow \infty \quad \dots(1.14)$$

c).- El contenido de humedad es máximo en el eje de simetría:

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = 0 \text{ a } r = 0; \theta > 0 \quad \dots(1.15)$$

d).- El contenido de humedad en la superficie está en equilibrio - con el aire de secado inmediatamente después de iniciada la - operación :

$$U = 0 ; r = R ; \theta > 0 \quad \dots(1.16)$$

Caso 2.- Resistencias externas considerables.

a).- El contenido inicial de humedad de la muestra es homogéneo:

$$U = (H_o - H_e) r, \quad \forall r; \quad \theta = 0 \quad \dots(1.17)$$

b).- El contenido final de humedad es homogéneo e igual al contenido de humedad en el equilibrio:

$$U = 0, \quad r; \quad \theta \longrightarrow \infty \quad \dots(1.18)$$

c).- El contenido de humedad es máximo en el eje de simetría:

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = 0; \quad r = 0; \quad \theta > 0 \quad \dots(1.19)$$

d).- El contenido de humedad en la superficie es función de la relación del coeficiente de transferencia de masa interno y externo:

$$\frac{\partial U}{\partial r} = U (1/r - k'/D_m) \quad \text{a } r = R; \quad \theta > 0 \quad \dots(1.20)$$

SOLUCION CASO 1.-

Considerando que⁽¹⁹⁾ :

$$\bar{H} = \int_0^R \frac{4\pi r^2 H}{(4/3)\pi R^3} dr \quad \dots(1.21)$$

y por medio del método de separación de variables, tenemos que la solución de la ecuación de difusión es la siguiente:

$$\frac{\bar{H} - H_e}{H_o - H_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(- \frac{n^2 \pi^2}{R^2} D_m \theta \right) \dots (1.22)$$

SOLUCION CASO 2.-

Si se define:

$$Bi = \frac{k'}{D_m} R \dots (1.23)$$

Aplicando el método de separación de variables y con las condiciones frontera citadas anteriormente:

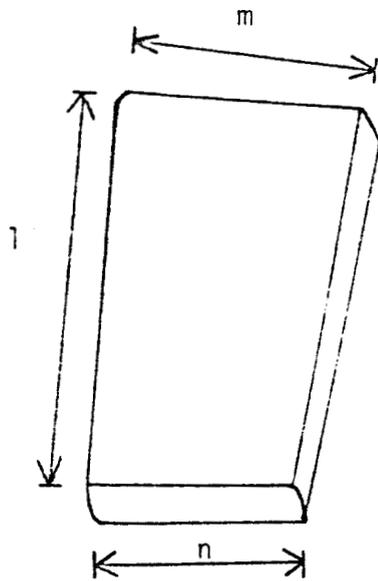
$$\frac{\bar{H} - H_e}{H_o - H_e} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} 6 Bi^2 \exp(-\lambda_n^2 D_m \theta / R)}{\sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n^2 [\lambda_n^2 + Bi (Bi - 1)]} \dots (1.24)$$

Esta ecuación nos permite el cálculo del número de Biot, así como también el del coeficiente de transferencia de masa externo en la superficie del sólido y el coeficiente de difusión.

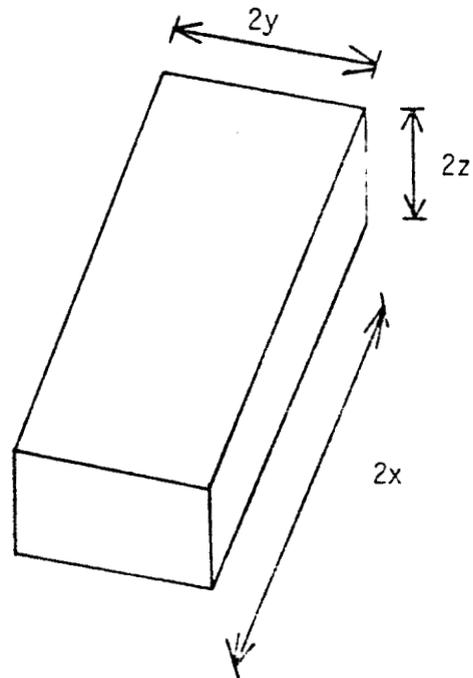
Las condiciones teóricas dadas anteriormente se aplican a sistemas simples. Sin embargo, los alimentos están constituidos por proteínas, carbohidratos, vitaminas y sales inorgánicas, muchas de las cuales están fuertemente hidratadas. Como ya se mencionó anteriormente el agua puede estar asociada de diversas maneras a un alimento, siendo su comportamiento durante el secado mucho más complejo que para el caso de materiales inorgánicos. En muchos estudios sobre el secado de alimentos se ha encontrado⁽²⁰⁾ que éste depende considerablemente de su composición y su modelamiento matemático es difícil.

Es importante tener bien en cuenta la forma de los granos de maíz utilizados en este

no coincide con la de la esfera, sin embargo sí se asemeja a la de un paralelepípedo. Suponiendo que el grano de maíz tiene forma de un paralelepípedo, cuyas dimensiones $2x$, $2y$ y $2z$ son equivalentes a las reales del grano, tal como se detalla en la Fig.2.



Dimensiones del grano de maíz.



Dimensiones del grano paralelepédico supuesto equivalente.

siendo:

$$2x = l$$

$$2y = (m+n)/2$$

$$2z = p$$

Fig.2.- Relación entre las dimensiones reales de los granos de maíz utilizados y las del paralelepípedo que se ha supuesto equi

Puede proponerse que dicha figura geométrica resulta de la intersección de tres láminas de caras paralelas, perpendiculares entre sí.

Si se admite el comportamiento isotrópico del grano de maíz - respecto a la difusión del agua, y se supone que ésta se desplaza en fase líquida a través del mismo, la ecuación representativa del fenómeno puede escribirse de la forma:

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} = D_m \frac{\partial^2 H}{\partial r_m^2} \quad \dots(1.25)$$

Al integrar esta ecuación para cada una de estas caras paralelas, admitiendo las hipótesis ya establecidas⁽²¹⁾, las cuales siempre se cumplieron en los experimentos realizados, resulta una ecuación de la forma:

$$\frac{\bar{H} - H_e}{H_o - H_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_m \theta}{4r_m^2} \quad \dots(1.26)$$

En la que r_m será igual a las dimensiones x, y y z respectivamente según que la ecuación 1.26 se aplique a una lámina de espesor 2x, 2y o 2z.

Si se designa por Y, Y' e Y'' al valor que toma el segundo miembro de la ecuación 1.26 para las láminas de espesor 2x, 2y y 2z, según el método propuesto por Newman y Charm⁽²¹⁾, la solución puede escribirse:

$$\frac{\bar{H} - H_e}{H_o - H_e} = Y Y' Y'' \quad \dots(1.27)$$

por lo tanto ésta queda como sigue:

$$\frac{\bar{H} - \text{He}}{H_0 - \text{He}} = \frac{8^3}{\pi^6} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_m}{4x^2} \theta \quad *$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_m}{4y^2} \theta \quad *$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_m}{4z^2} \theta$$

...(1.28)

C A P I T U L O 2 .

2.- M E T O D O L O G I A .

2.1.- MATERIALES.

El maíz que se utilizó en los diferentes experimentos fué mues treado en los molinos de nixtamal de las delegaciones de Coyoacán e Iztapalapa en el Distrito Federal, y lo proporcionó el Instituto Na cional de la Nutrición - Salvador Zubirán (I.N.N. - S.Z.). Este - maíz se seleccionó debidamente con el fin de contar con un grano - completamente sano y de tamaño uniforme.

Como medio fluidizante se empleó aire con bajo contenido de - humedad (0.003 g. agua / g. aire seco).

Los insectos utilizados fueron de la especie Sitophilus zeamais, adultos; proporcionados por el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México. Las características de los mismos se - especifican en el Apéndice B.1.

2.2.- DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS EXPERIMENTALES UTILIZADOS.

2.2.1.- Celdas de medición de actividad acuosa.

Para la determinación de las isothermas de desorción, se cons- truyeron unas cámaras o celdas de humedad constante que consisten en frascos de vidrio de 500 ml de capacidad, a los cuales se les - hizo una horadación en la tapa, para colocar un tapón de hule. De- este tapón colgaba un plato de aluminio sujeto con alambre de cobre, como se muestra en la Fig. 3. En estas celdas se vertieron solucio- nes saturadas de distintas sales procurando dejar el mínimo de es- pacio libre entre el plato de aluminio y el nivel de la solución, con el objeto de alcanzar rápidamente el equilibrio.

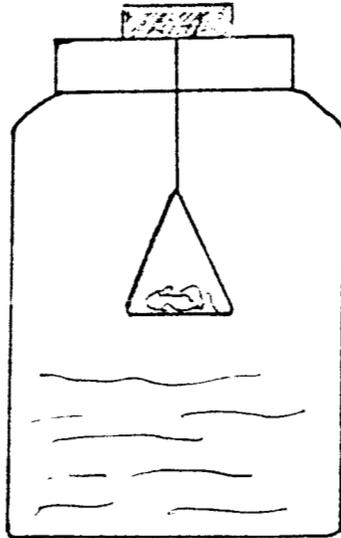


Fig.3.- Celda de medición de actividad acuosa.

2.2.2.- Lecho fluidizado.

De acuerdo al diagrama de la Fig.4, la descripción del equipo experimental es la siguiente:

El aire del medio ambiente es alimentado por medio de una compresora centrífuga (1) a un filtro (2), con el fin de eliminar el exceso de agua y el aceite que pudiera ser arrastrado desde la compresora. De ahí pasa a un regulador de presión (3) y posteriormente a un sistema de dos columnas empacadas con gel de sílice (4), conectadas en paralelo, cuya función es disminuir al máximo la humedad absoluta del aire. Conectado a la línea en este punto, se encuentra un manómetro (5), para determinar la presión en la línea, la cual debe permanecer constante (45 lb/plg^2). Posteriormente, el aire se alimenta a un sistema de medición de flujo (6), que consta de -

una reducción de diámetro de la tubería y un manómetro en "U", con el fin de crear una caída de presión artificial, la cual ha sido debidamente calibrada (Apéndice A.1). El rango de este medidor es de 0 a 350 l/min. De aquí, el aire continúa hasta llegar al sistema de calentamiento que consta de una resistencia eléctrica y un reóstato, la primera cubre la tubería por donde éste circula (7) y el segundo (8) se encarga de controlar la temperatura de alimentación del aire, así como también poder manipular el rango de operación de la misma. A partir de este punto la línea se encuentra aislada para así evitar el intercambio de calor con los alrededores. En seguida se llega al secador de lecho fluidizado (9), formado por: plato distribuidor, lecho fluidizado y manómetro diferencial, cuyas dimensiones son de 5.0 cm de diámetro externo y una altura de 30.0 cm.

En la base del secador se localiza un termómetro para medir la temperatura del aire de alimentación.

El plato distribuidor consiste en una placa perforada de Nylamid (perforaciones en arreglo cuadrado de 1.0 mm de diámetro), que se encuentra sellada con silicón al tubo de vidrio que constituye el lecho; exactamente debajo del plato distribuidor se encuentra una salida lateral conectada a un manómetro en "U", para medir la caída de presión total, a partir de la cual, mediante un balance de fuerzas se obtiene la caída de presión en el lecho.

El lecho en la parte superior tiene un codo de 90°, el cual es desmontable para facilitar la toma de muestras durante la corrida.

La muestra que se va a fluidizar se carga por la parte superior del secador. La línea que sale de la parte superior del secador va a dar a un ciclón, el cual tiene como función recuperar los "finos" arrastrados, los cuales se producen por degradación mecánica del grano y/o pueden ser los insectos que son arrastrados por el gas (10). El aire que sale por la parte superior del ciclón pasa por una celda de medición de temperatura de bulbo seco y húmedo (11). Las dimensiones de ésta son las adecuadas para dar al aire la suficiente

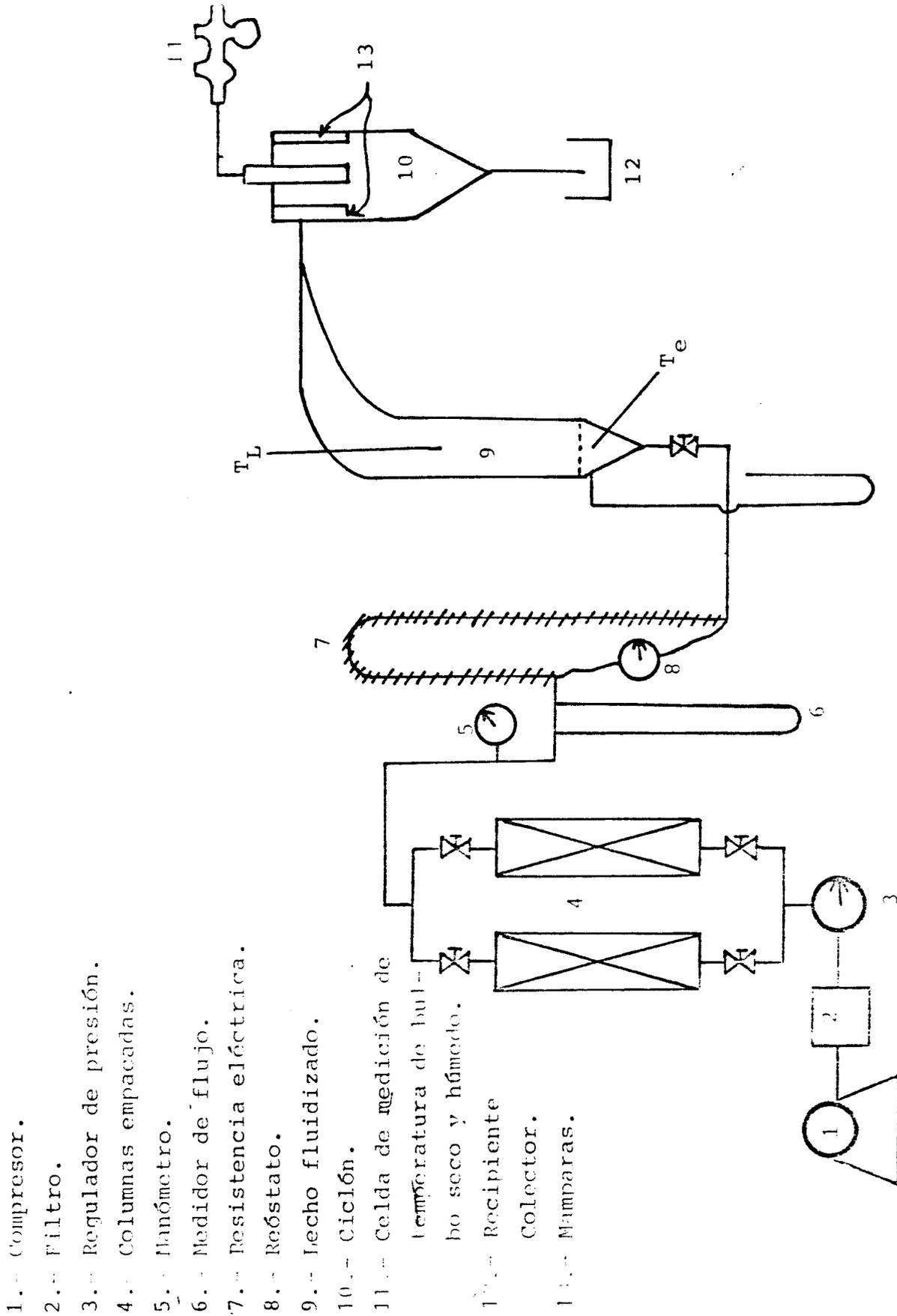


Fig. 4.- Diagrama de flujo del equipo experimental.

velocidad de tal manera que se alcance el equilibrio en el termómetro de bulbo húmedo.

Por último, en la salida inferior del ciclón se encuentra un recipiente colector para recibir a los insectos que son arrastrados por el gas (12) .

2.3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.3.1.- Caracterización física e hidrodinámica del maíz.

El diámetro equivalente de partícula del maíz se obtuvo midiendo las longitudes características de diferentes granos e igualando el área exterior calculada, con la correspondiente a una esfera. - Con el fin de comparar tal resultado, un procedimiento alternativo consistió en medir el volumen desplazado de agua por un grano e igualando tal volumen al de una esfera. De la fórmula geométrica correspondiente se evaluó el diámetro equivalente. Con estos mismos datos se determinó la esfericidad al dividir el área calculada a partir de las longitudes características entre el área de la esfera calculada con el volumen desplazado de agua.

La densidad aparente del maíz se determinó por picnometría utilizando granos saturados con agua. Empleando una probeta se determinó la densidad empacada.

Finalmente, la velocidad mínima de fluidización se determinó experimentalmente con el equipo descrito anteriormente con el siguiente procedimiento:

El equipo se cargó con granos de maíz hasta lograr una altura igual al diámetro del secador (5.0 cm). Se hizo pasar una corriente de aire aumentando progresivamente su gasto. A cada lectura del medidor de flujo, se midió la caída de presión total en el lecho, mediante la diferencia de alturas en las ramas del manómetro adecuado

al caso.

Esta lectura de caída de presión total se corrigió por la caída de presión debida al plato distribuidor. Esta última caída de presión fué evaluada de la misma forma que la total, solo que se tenía el aparato vacío. La siguiente igualdad nos permite conocer la caída de presión en el lecho:

$$\Delta P_L = \Delta P_T - \Delta P_d \quad \dots(2.1)$$

A un determinado gasto, correspondiente a la región de fluidización, la experiencia se repite en sentido inverso, disminuyendo el gasto en el mismo intervalo de operación, ya que en el punto donde cambia la pendiente de la línea que relaciona la caída de presión contra la velocidad del fluido se localiza la velocidad mínima de fluidización.

Si se relacionan los datos de densidad aparente y empacada, se puede calcular la fracción de vacío en el lecho empacado y la correspondiente a condiciones de fluidización mínima:

$$\epsilon_e = \frac{1/\rho_e - 1/\rho_a}{1/\rho_e} = \frac{\text{volumen vacío entre granos/unidad de masa}}{\text{volumen de lecho empacado/unidad de masa}} \quad \dots(2.2)$$

Multiplicando el volumen vacío por la masa empacada, se obtie

ne el volumen vacío en el lecho, el cual al ser dividido por el volumen ocupado por el lecho a condiciones de fluidización mínima, nos da la fracción de vacío a estas condiciones.

2.3.2.- Elección de los límites de los parámetros estudiados.

Los parámetros manejados fueron: velocidad superficial del aire, temperatura de alimentación del mismo y relación altura/diámetro del lecho. El rango utilizado para cada uno de ellos se eligió de acuerdo al siguiente criterio:

La relación altura/diámetro del lecho se fijó de tal modo que al menos se pudiera manejar una muestra representativa de maíz. Así mismo, se consideró el hecho de que al aumentar esta relación fuera más evidente el efecto de pared, lo que afectaría la calidad de la fluidización, existiendo la posibilidad de la presencia del fenómeno de "pistoneo", Por lo tanto, para esta relación, el valor mínimo y máximo fijado fué de 0.5 y 2.0 respectivamente.

Para el rango de velocidades superficiales se tomó como base la velocidad mínima de fluidización, de modo que el intervalo estudiado comprendiera una condición para lecho fijo, de tal manera que ésta fuera de utilidad como comparación con el lecho fluidizado. Además, se fijaron los otros valores de la velocidad superficial del aire hasta que no se produjera arrastre de maíz, y que a su vez fueran superiores a la velocidad terminal del insecto muerto (50 cm/seg).

La temperatura del aire de alimentación se eligió de modo que abarcara un intervalo que comprendiera un valor muy próximo a la temperatura ambiente y el valor máximo que no produjera alteración en el poder germinativo del maíz.

Con los criterios anteriormente citados, las variables se fijaron en los siguientes valores:

$L/D = 0.5, 1.0, 1.5 \text{ y } 2.0$.

$U_f = 90$ (lecho fijo), 240, 300 y 360 cm/seg.

$T_e = 30, 40, 50 \text{ y } 60^\circ\text{C}$.

2.3.3.- Isotermas de desorción.

La muestra húmeda fué pesada y colocada dentro de cada una de las celdas de humedad relativa conocida a una temperatura constante. Se dejaron unos días en reposo y la pérdida en peso era medida hasta llegar al equilibrio (Método de aproximación al equilibrio en una celda⁽²²⁾). El criterio que se siguió para determinar las condiciones de equilibrio fué tener un peso constante en las 3 primeras cifras decimales durante 2 días consecutivos. Las muestras se pesaron en una balanza analítica Sartorius 2000. Al llegar al equilibrio se determinó el contenido de humedad de las mismas. Con los datos de humedad relativa y contenido de humedad a temperatura constante se graficaron las isotermas de desorción. Estas determinaciones se hicieron para las cuatro distintas temperaturas (30, 40, 50 y 60°C).

2.3.4.- Secado.

El diseño experimental utilizado para el tratamiento de las muestras en el lecho fluidizado se encuentra en la tabla 2. Algunas de estas experiencias se realizaron por triplicado y las otras se duplicaron, ya que no se consideró necesario que se repitieran un mayor número de veces, pues se observó una buena reproducibilidad de las experiencias.

Una corrida experimental típica se desarrolla de acuerdo a la siguiente rutina:

Uf (cm/seg)	90	240	300	360
L/D	0.5,1.0, 1.5,2.0	0.5,1.0, 1.5,2.0	0.5,1.0, 1.5,2.0	0.5,1.0, 1.5,2.0
Te(°C)	30	30,40, 50,60	30	30

Tabla 2.- Relaciones entre los valores de los parámetros estudiados durante la operación de secado. A $U_f = 240$ cm/seg y $L/D = 1.0$, se varió la temperatura entre 30 y 60 °C .

- 1.- Se mide la temperatura de bulbo seco y húmedo, para así determinar las condiciones de entrada (sin cargar la muestra en el lecho), esto se realiza con la ayuda de la carta psicrométrica construida a las condiciones de operación del aparato (Apéndice A, Fig.2): temperatura de bulbo seco ($t_{b.s.}$), temperatura de bulbo húmedo ($t_{b.h.}$) y contenido de humedad (H).
- 2.- Se fija el gasto de aire con el que se va a trabajar manteniéndolo constante durante todo el tiempo que dura la corrida.
- 3.- Por la parte superior del lecho se carga la muestra a fluidizar previamente pesada y a humedad homogénea, [36 % (b.s.)] en promedio y se mantiene el equipo a condiciones estables de opera-

ción (gasto y temperatura del aire alimentado constantes). Para lograr el contenido de humedad deseado, se humedeció la muestra artificialmente, lavándola con agua tibia, y manteniéndolo sumergido en ella por un espacio de 5 horas.

- 4.- Se acciona el cronómetro para determinar los intervalos de tiempo en los que se realizan las mediciones. Siendo éstos, para los primeros 60 minutos de operación, de 15 minutos cada uno, y posteriormente de 20 y 30 minutos, ya que durante el período de velocidad decreciente de secado, ésta se va haciendo más lenta.
- 5.- Una vez que ha transcurrido el intervalo de tiempo dado, se hacen las siguientes mediciones: temperatura de bulbo seco (t b.s.), temperatura de bulbo húmedo (t b.h.) y temperatura de entrada (Te).
- 6.- Para poder conocer el porcentaje de humedad en el sólido, se saca una pequeña muestra de sólido (aproximadamente 0.4 g.), se coloca en un pesafiltro y se pesa en una balanza analítica, se mete al horno a 80 °C durante 36 horas, para secarla hasta peso constante. Por diferencia de pesos, de acuerdo a la siguiente ecuación, se puede calcular la humedad en el grano (base seca).

$$H = \frac{\text{Peso de muestra húmeda} - \text{Peso de muestra seca}}{\text{Peso de muestra seca}} \times 100 \quad \dots(2.3)$$

2.3.5.- Evaluación del grado de desinfestación.

Inicialmente se pensó en evaluar la velocidad de separación del insecto por medio de la ecuación 1.2; pero ya que ésta ocurrió suma

mente rápido no fué posible realizarlo.

De este modo, se recurrió a evaluar la eficiencia del lecho fluidizado en esta operación, por un método indirecto, por lo que se realizaron varios análisis bromatológicos (proteína cruda y carbohidratos totales disponibles) a las diferentes muestras de acuerdo al siguiente procedimiento experimental:

Se utilizaron como contenedores de maíz frascos de vidrio de boca ancha con capacidad de 500 ml, y cubiertos con una malla de alambre, calibre 100.

Se infestaron artificialmente 17 lotes de maíz, conteniendo 55 g. de maíz con un contenido de humedad promedio de 36% (b.s.). Esta cantidad de muestra fué elegida para mantener la relación altura/diámetro del lecho igual a 1.0. Cada lote contenía una densidad de población de insectos adultos de 200/Kg. de maíz húmedo, esta densidad poblacional puede calificarse como "alta" de acuerdo a los criterios de evaluación de infestación⁽²³⁾ en granos almacenados; sin embargo no es excepcional, ya que Quintana y colaboradores informan⁽²⁴⁾ haber encontrado en estudios de campo alrededor de 200 insectos por Kg. de maíz. La ventaja de utilizar una carga alta de insectos, es que se aceleran los efectos de la infestación.

El diseño experimental utilizado para el tratamiento de las muestras en el lecho fluidizado se puede apreciar en la Tabla 3. Cada uno de los experimentos se realizó por triplicado al séptimo día de su infestación.

La finalidad de que se trataran 3 muestras a las mismas condiciones fué, la de poder realizarles análisis bromatológicos (proteína cruda y carbohidratos totales disponibles) a diferentes tiempos de almacenamiento.

Los análisis que se les realizaron a cada lote fueron los de proteína cruda por macro-Kjeldhal⁽²⁵⁾, que consiste en la determinación del nitrógeno total; que al multiplicarse por un factor ya establecido nos da el contenido equivalente de proteína cruda (Apén

dice B.2). Así como también el de carbohidratos totales disponibles por Antrona⁽²⁶⁾, que es la determinación de éstos como glucosa, utilizando la curva de calibración del espectrofotómetro que se muestra en el Apéndice B.3.

Tratamiento \ Parámetros	Tratamiento			
	I	II	III	IV
H _F (b.s.)	10	14	10	14
Te(°C)	30	30	60	60

Tabla 3.- Relaciones de temperatura de entrada y humedad final a la que se trataron 3 muestras de maíz infestadas, a una velocidad de fluidización constante: $U_f = 240$ cm/seg.

Además, se evaluaron las pérdidas en peso de dichos lotes. Estos análisis se efectuaron a los 15, 30 y 45 días de su almacenamiento, manteniéndose las muestras en una cámara de ambiente controlado a 61 ± 3 % H.R. y 27 ± 1 ° C, que corresponden a las condiciones óptimas para el desarrollo de esta familia de insectos⁽⁶⁾.

A cuatro muestras no se les aplicó ningún tratamiento y se mantuvieron a las mismas condiciones, éstas se utilizaron como testigos.

Los análisis bromatológicos se realizaron por duplicado.

Como ya se mencionó, los períodos establecidos para la cuantificación de pérdidas en las muestras fueron: 15, 30 y 45 días de incubación, contados a partir del día de infestación de la muestra. - Al término de cada período se sacaron de la cámara de ambiente controlado las 5 muestras a las que se les realizaron los análisis. El contenido de cada frasco de maíz se pesó y posteriormente se separó en 4 fracciones que se denominaron: a).- grano no-picado (sano), - b).- grano picado, c).- polvo y d).- grano dañado por hongos y levaduras.

Los insectos adultos que se encontraban en el interior y exterior de los granos fueron retirados, de modo que no interfirieran en el resultado de los análisis.

C A P I T U L O 3 .

3.- P R E S E N T A C I O N Y D I S C U S I O N D E R E S U L T A D O S .

3.1.- CARACTERIZACION FISICA E HIDRODINAMICA DEL MAIZ.

Los resultados de las determinaciones para densidad aparente, densidad empacada, diámetro equivalente de partícula y esfericidad se encuentran reportados en la Tabla 4.

Tales determinaciones, como ya se mencionó, se basaron en las mediciones directas del área exterior del grano de maíz, evaluación del volumen desplazado de agua en un picnómetro y cálculo del área equivalente a partir de la fórmula geométrica de una esfera. Los datos así obtenidos se presentan en la Tabla 5.

$$\rho_a = 1.21 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_e = 0.756 \text{ g/cm}^3$$

$$d_{pe} = 0.60 \text{ cm}$$

$$\phi_s = 0.70 \text{ adimensional}$$

Tabla 4.- Características físicas del maíz.

En la Fig.5 se presenta la gráfica de caída de presión en el lecho contra la velocidad superficial del aire. La respuesta de la caída de presión al flujo de aire nos permite definir las condicio

Sm (cm ²)	Vm (cm ³)	R (cm)	Ae (cm ²)	ϕ_s Adimensional.
1.79	0.132	0.316	1.253	0.700
1.64	0.117	0.303	1.159	0.706
2.30	0.208	0.367	1.697	0.738
1.83	0.146	0.327	1.345	0.735
2.30	0.200	0.362	1.653	0.719
1.49	0.102	0.290	1.060	0.710
2.15	0.183	0.352	1.560	0.720
1.92	0.144	0.325	1.328	0.692
1.34	0.080	0.267	0.890	0.670
1.56	0.096	0.284	1.014	0.649
1.84	0.140	0.322	1.804	0.708
1.31	0.077	0.264	0.875	0.668
1.94	0.146	0.327	1.346	0.693
1.71	0.108	0.295	1.096	0.641
1.28	0.077	0.264	0.875	0.689
1.43	0.105	0.293	1.076	0.750
1.38	0.093	0.281	0.995	0.720
1.40	0.096	0.284	1.014	0.720
1.56	0.117	0.303	1.159	0.740
1.56	0.117	0.303	1.159	0.740

Tabla 5.- Determinación de d_{pe} y ϕ_s . Sm es el área total que se midió con un vernier tomando las longitudes características de cada grano y Vm es el volumen desplazado de agua en un picnómetro.

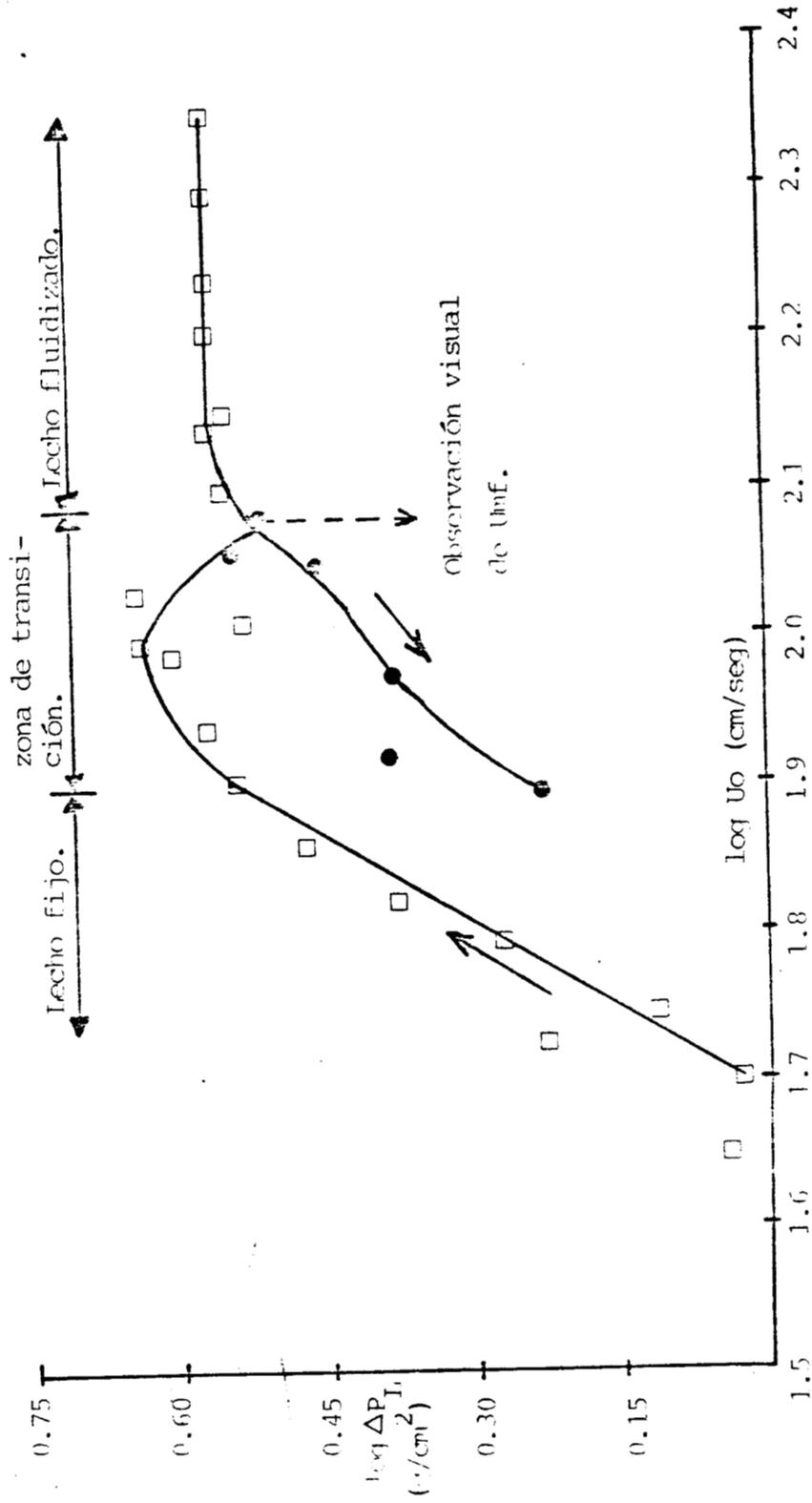


Fig. 5.- Variación de la caída de presión vs. velocidad superficial del aire.

nes de operación a partir de las diferentes zonas que se pueden - observar: región de lecho fijo, velocidad mínima de fluidización y región de lecho fluidizado. Analizando esta figura, podemos notar que la velocidad mínima de fluidización para el maíz seco, determinada a las condiciones de operación indicadas, fué de 120 cm/seg. Los datos obtenidos para la construcción de esta figura se presentan en la Tabla 1 del Apéndice A.

Con el volumen del lecho expandido a condiciones de velocidad mínima de fluidización y apoyados en la ecuación 2.2, se calculó la fracción de volumen vacío en el lecho, siendo ésta, $\epsilon_{mf} = 0.467$.

3.2. ISOTERMAS DE DESORCION.

Se construyeron las isotermas de desorción para el maíz a temperaturas de 30, 40, 50 y 60°C. Los datos primarios para la construcción de las mismas se localizan en la Tabla 1 del Apéndice C. Normalmente, estas isotermas se utilizaron para predecir la humedad en el equilibrio en función de la actividad del agua y además, se aplicaron para el cálculo del parámetro de humedad reducida que se empleó en el modelo de difusión molecular.

Se puede observar en la Fig. 6, que un aumento en la temperatura se traduce en una disminución en la humedad de equilibrio. Por lo tanto, se puede esperar que al aumentar la temperatura de alimentación, se aumenta también la velocidad de secado y consecuentemente se obtiene un menor contenido de humedad.

3.3.- SECADO.

A cada intervalo de tiempo durante la corrida experimental, se midieron las temperaturas T_e , $t_b.s.$ y $t_b.h.$, y además se sacaron del lecho, muestras de maíz para determinarle su contenido de humedad, de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo anterior.

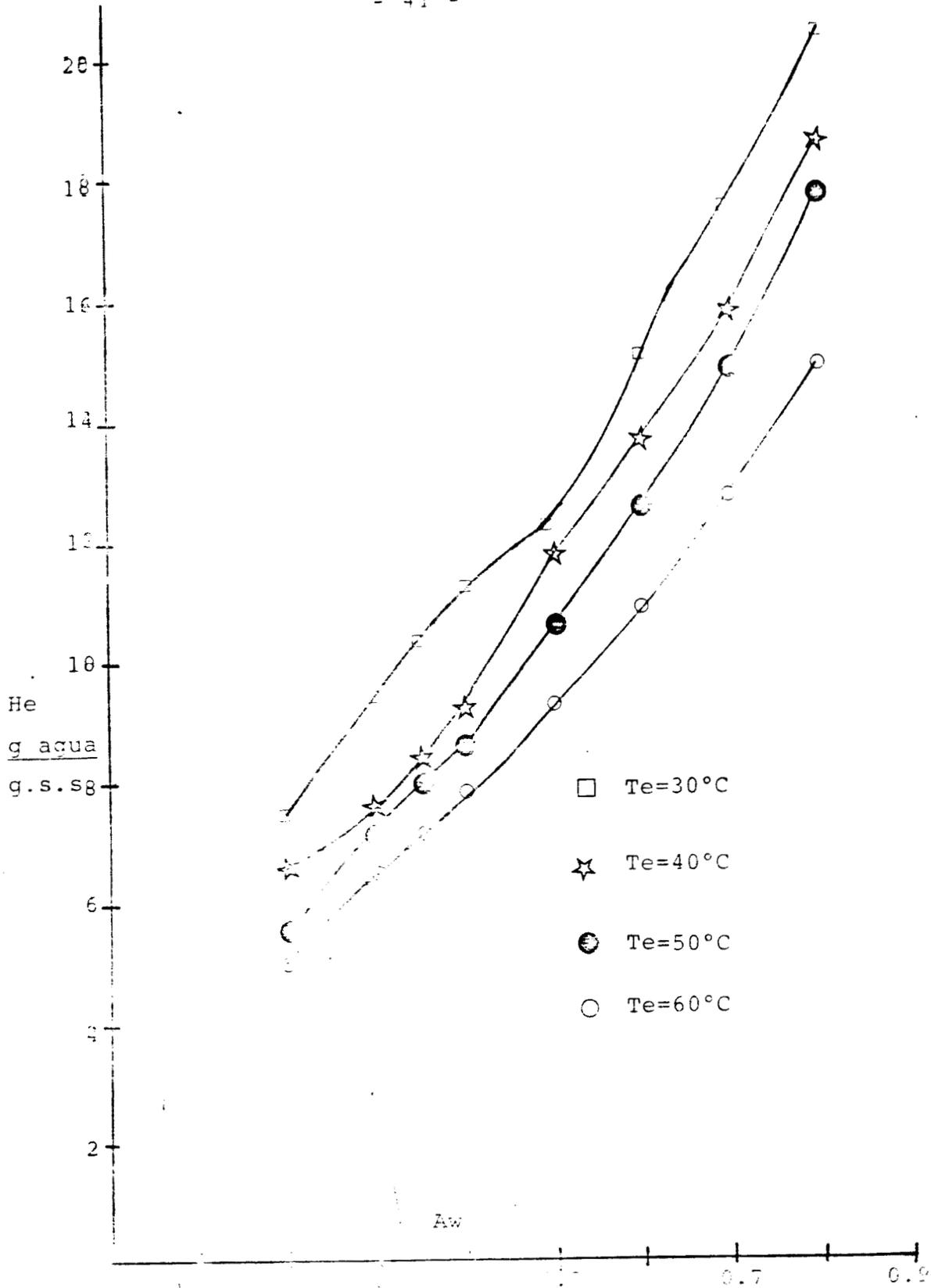


Fig.6.- Isotermias de desorción del maíz a diferentes temperaturas.

De esta manera, los datos primarios así obtenidos, sirvieron de base para desarrollar los cálculos que condujeron al establecimiento de los valores de los coeficientes de transferencia de masa y calor y del coeficiente efectivo de Difusión Molecular.

En las Tablas 2 a 20 del Apéndice C se presentan los datos primarios correspondientes a las distintas condiciones experimentales. Cabe señalar, que con la ayuda de la carta psicrométrica, corregida a las condiciones de presión de la Cd. de México, se determinó la humedad absoluta del aire

En las Figs. 7, 8, 9 y 10 se graficaron los datos de \bar{H} vs. θ , para una L/D y temperatura fijas y a las diferentes velocidades superficiales del aire que se manejaron.

En estas figuras se observa que en muy pocos casos se presenta el período constante de secado, lo cual era de esperarse, dada la estructura interna y la naturaleza higroscópica del maíz. Sin embargo, con el fin de tener idea acerca de la magnitud de los coeficientes de transferencia de masa y calor a las condiciones operadas, se procedió a su cálculo. Para ello se recurrió a los balances respectivos planteados en el capítulo 1. Despejando de tales balances los coeficientes de transferencia de masa y calor, ecuaciones 1.3 y 1.4, se obtiene:

$$k_m = \frac{\rho_a}{\rho_g} \frac{(-dH/d\theta)}{(H_{b.h.} - H) A} \quad \dots(3.1)$$

$$h = \frac{L \rho_a}{A} \frac{(-dH/d\theta)}{(t_{b.s.} - t_{b.h.})} \quad \dots(3.2)$$

Una secuencia de cálculo para estos coeficientes se presenta en el Apéndice D.1. Los datos de velocidad de secado se encuentran en -

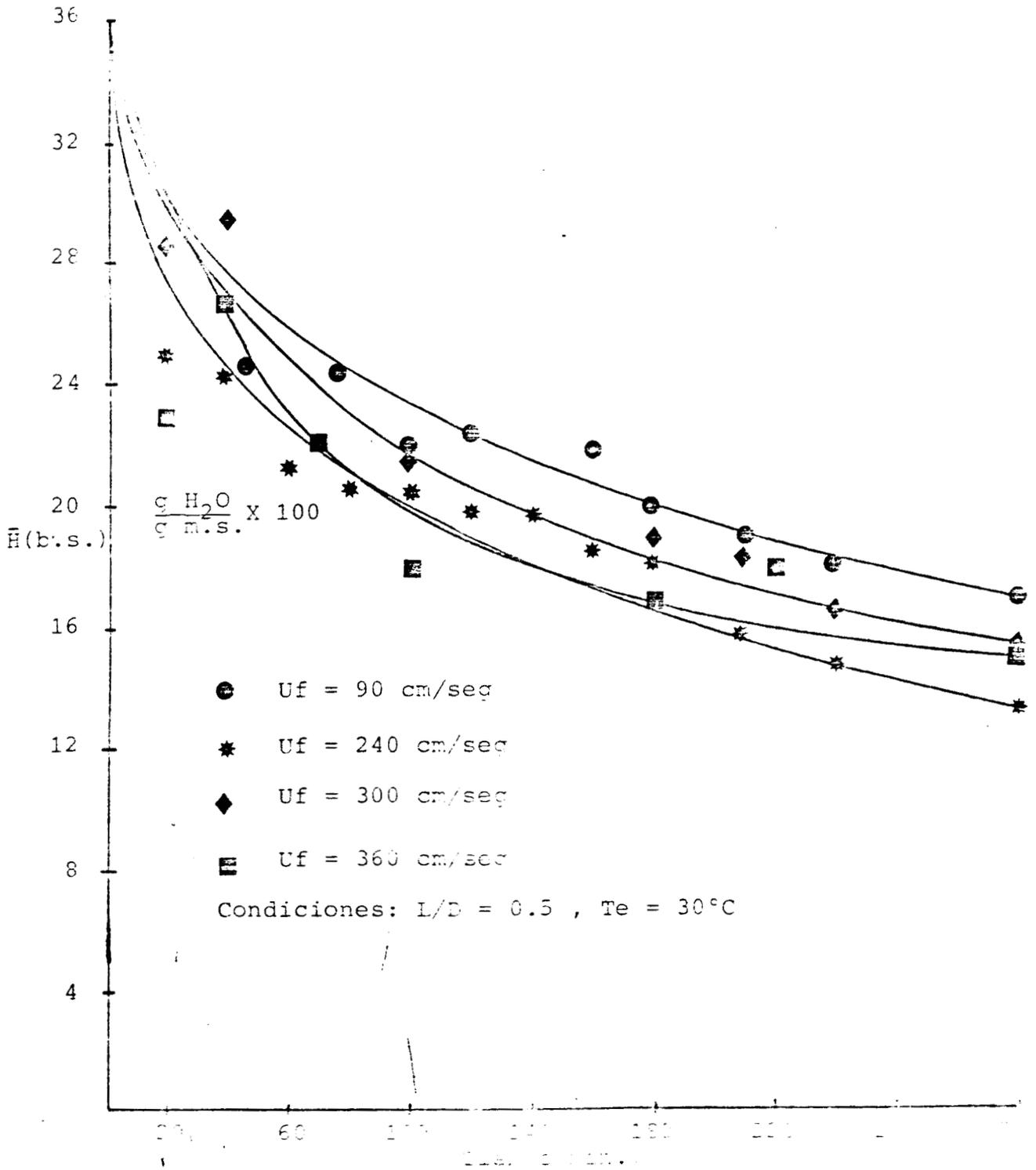


Fig.7.- Curvas de variación del contenido de humedad del maíz con respecto al tiempo. Temperatura y L/D ctes.

la Tabla 1 del mismo Apéndice D; y los valores de estos coeficientes se presentan en la Tabla 6.

Se puede notar en esta tabla, que a L/D constante, la variación de la velocidad superficial no tienen un efecto sensible en los valores de los coeficientes de transferencia de masa y calor. Este resultado no es de sorprender dado que ya hemos señalado que el proceso de secado de maíz pudiera estar controlado por el mecanismo de difusión. O dicho de otra manera, estos resultados ponen de manifiesto el hecho de que las resistencias externas a la transferencia de masa y calor son despreciables.

Utilizando los resultados obtenidos a las condiciones de lecho fijo (90 cm/seg), y comparándolos con los del lecho fluidizado, podemos notar que existe una marcada diferencia entre las velocidades de secado, como puede observarse por ejemplo en la Fig.8, donde se analiza la influencia de la velocidad superficial a una L/D de 1.0 y T_e de 30°C. Durante el período de velocidad constante de secado - se observa aproximadamente la misma pendiente, en ambos casos, aunque encontrándose trasladada hacia la izquierda la correspondiente al lecho fluidizado. Sin embargo, en el período de velocidad decreciente de secado, se observa que para el lecho fijo la curva se vuelve asintótica antes que para el lecho fluidizado, obteniéndose para este último un contenido de humedad menor en el grano en el mismo período de tiempo. Esto significa que durante la operación de secado en el lecho fluidizado, la eficiencia de contacto del área disponible para la transferencia de masa es mayor que en el lecho fijo.

En la Fig.8 también se puede observar que no existe una influencia notable de la velocidad superficial del aire sobre la velocidad de secado del maíz. Esto confirma nuevamente que el fenómeno de secado está controlado por difusión intra-partícula y no por la transferencia externa de masa, lo cual pudo corroborarse al aplicar el modelo de difusión molecular.

Haciendo un análisis de las curvas a las velocidades superficiales de 240 y 300 cm/seg (Fig.8) notamos que éstas presentan un con-

coe-fi-cien-te.		km (cm/min)	$h \times 10^3$ (cal/cm ² min°C)
Parámetro	UF (cm/seg)		
1.0	90	30.1370	8.1537
1.0	240	30.9170	9.4400
1.0	300	30.9200	9.4500
1.5	90	30.1500	10.2700
1.5	240	30.1492	10.2967

Tabla 6.- Valores de los coeficientes de transferencia de calor y masa para las diferentes condiciones que presentan período constante de secado.

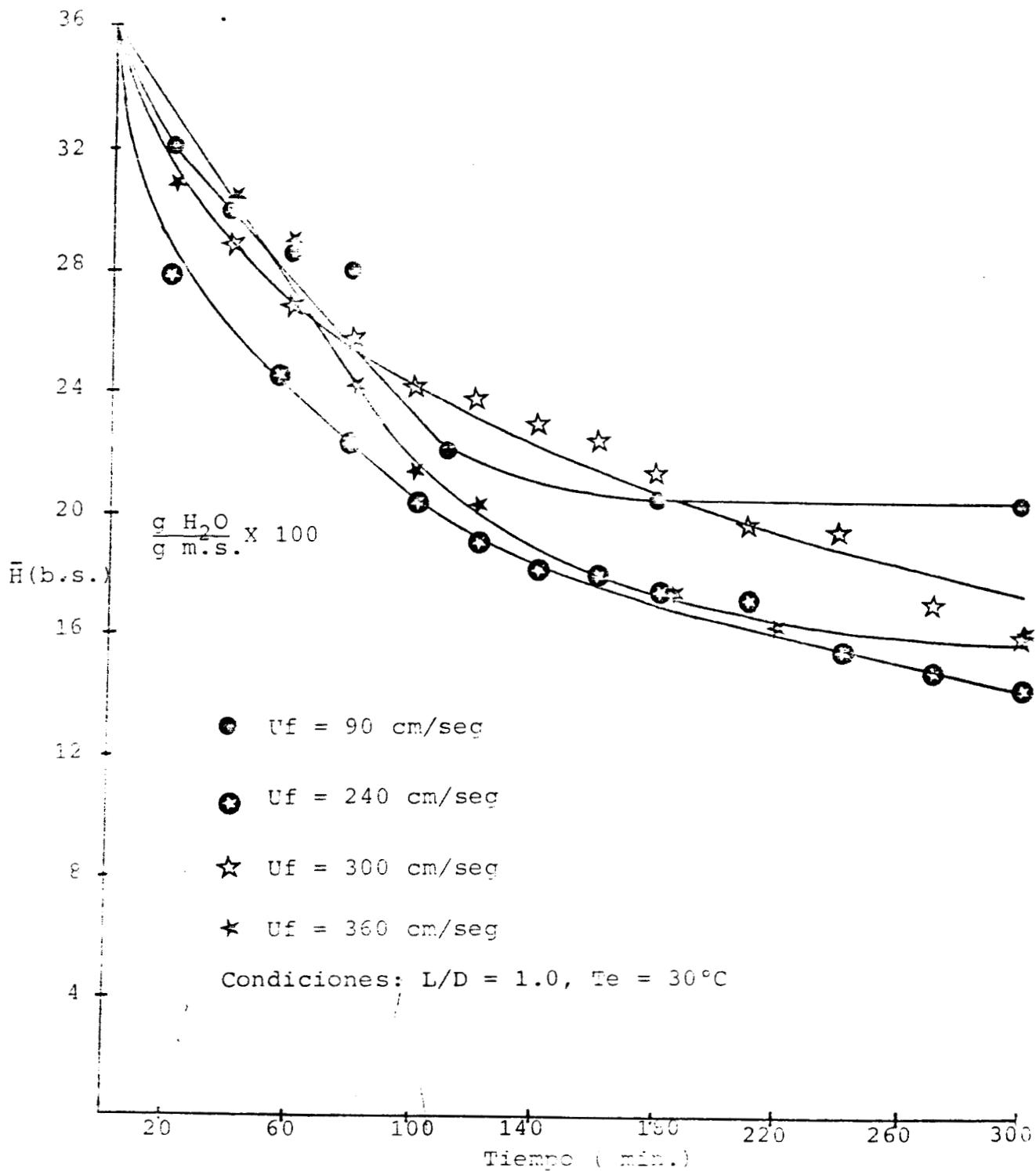


Fig. 1. Variación del contenido de agua en el núcleo del tubo con el tiempo. Temperatura y L/D constantes.

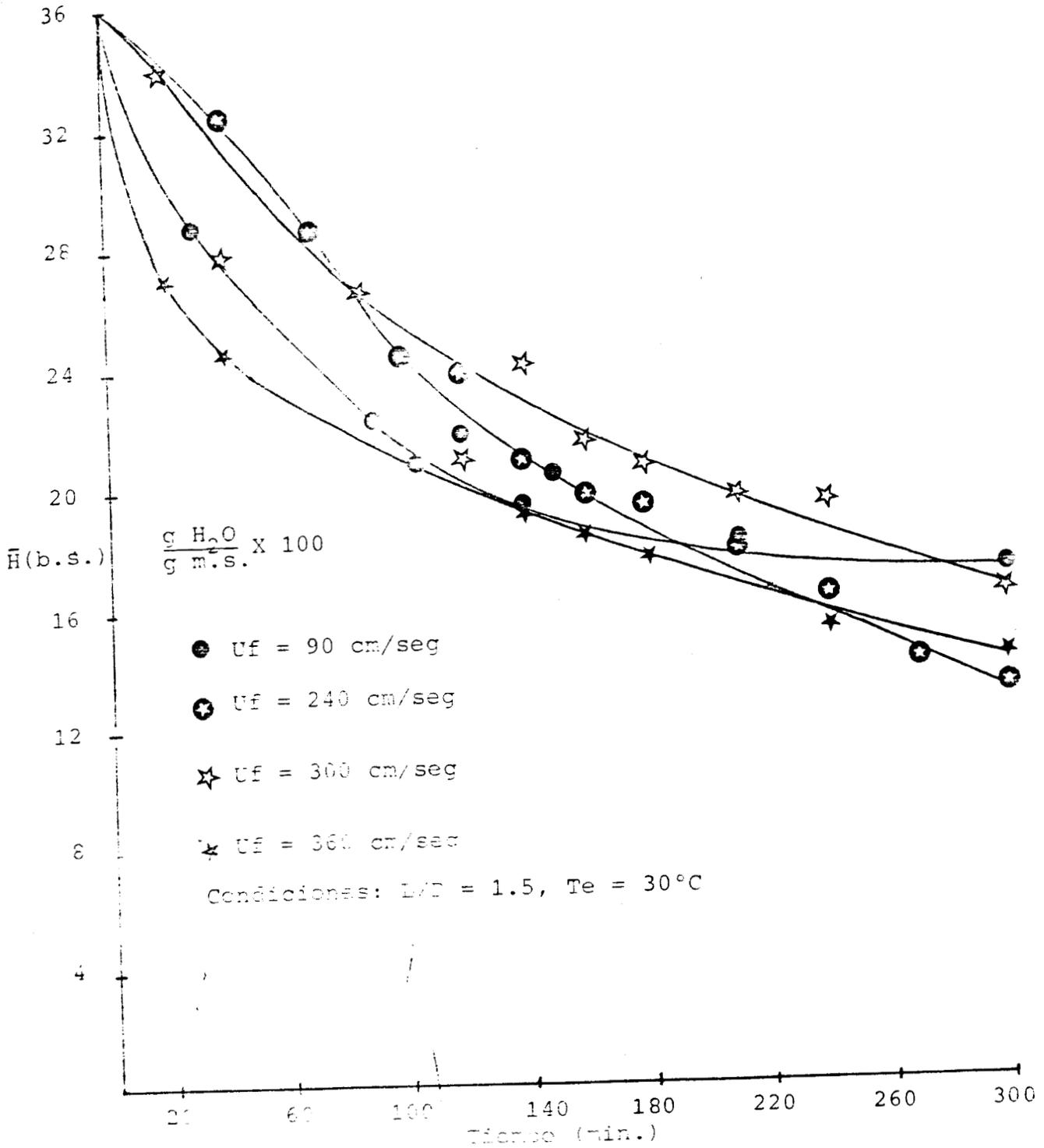


Fig. 5.- Variación del contenido de humedad del maíz con respecto al tiempo. Temperatura y L/D constantes.

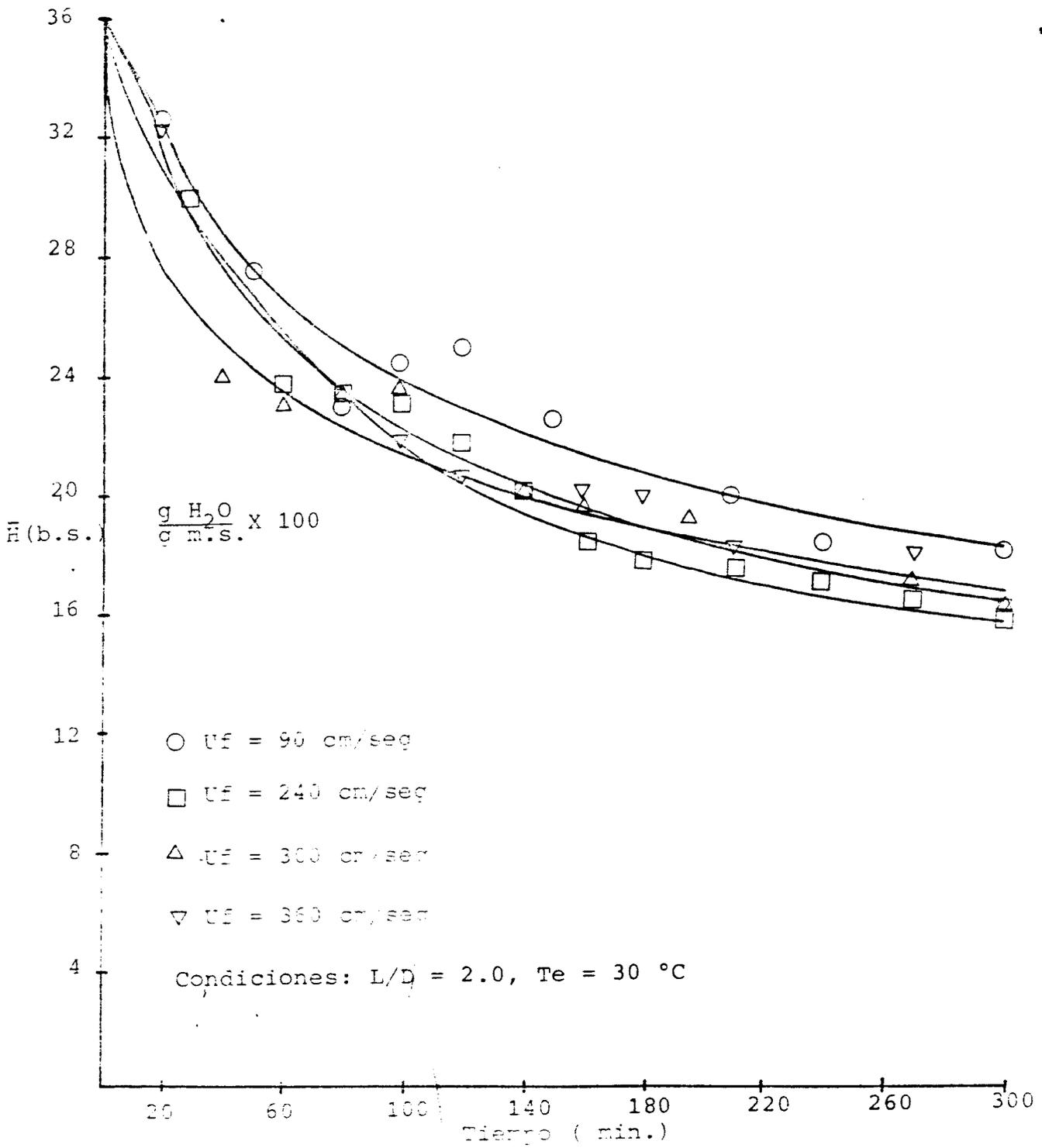


Fig. 1. Relationship between the average humidity of the paper and the superficial velocity, with respect to, the time. Temperature and L/D constants.

portamiento anómalo, en cuanto a que la velocidad de secado es mayor a una velocidad menor de aire. Esto puede deberse a que a la velocidad más alta, se obtiene una mala calidad de la fluidización debido a la presencia del fenómeno de "pistoneo", que provoca el aglomeramiento de partículas, ocasionando una disminución en el área de contacto entre el aire y el maíz, y por consiguiente, reduciendo la eficiencia del secador.

Por otro lado, a una velocidad superficial del aire de 240 cm/seg se observa una buena calidad de fluidización exhibiéndose mejores - condiciones de secado. Las mismas tendencias generales se observan en las Figs.7, 9 y 10.

Al analizar el efecto de L/D sobre la velocidad de secado, se observa, para el caso en que $U_f = 240$ cm/seg y $T_e = 30$ °C (Fig.11), que conforme aumenta la relación L/D de 0.5 a 2.0, ocurre una superposición de las curvas de secado, no pudiéndose apreciar una diferencia marcada entre éstas. En este caso se esperaría que al amentar la relación L/D, disminuyera la velocidad de secado, ya que la cantidad de agua a remover es mayor. Nuevamente, puede atribuirse este comportamiento inesperado al fenómeno de "pistoneo" que afecta la calidad de la fluidización. Cabe señalar que muy posiblemente el fenómeno de pistoneo en el secador se deba a que, en determinadas - condiciones de operación, el efecto de pared es considerable. Un comportamiento similar se observó a las otras velocidades superficiales de aire estudiadas (Figs. 12, 13 y 14).

El efecto de la temperatura (30, 40, 50 y 60°C) sobre la velocidad de secado se muestra en la Fig.15, para una L/D de 1.0 y una U_f de 240 cm/seg, las cuales corresponden a las mejores condiciones de fluidización. En esta figura se puede observar que, conforme aumenta la temperatura, se incrementa la velocidad de secado y el período de velocidad constante de secado tiende a desaparecer. Este último aspecto no resulta muy conveniente, ya que al verse sujeto el maíz a condiciones de secado, por espacios de tiempo prolongados, durante

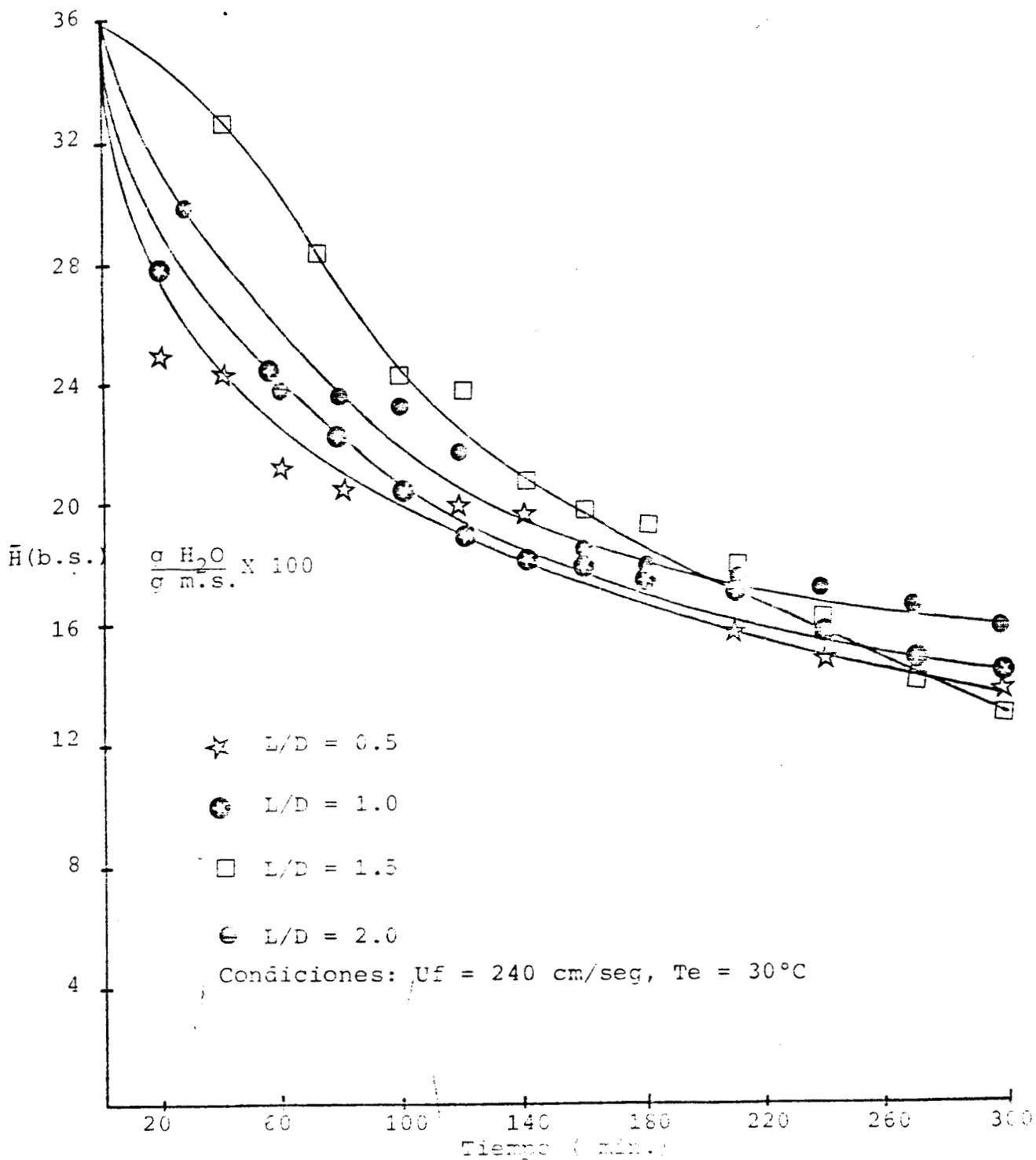


Fig. 1. Relationship between the average number of water molecules per gram of solid and time. Temperature and velocity sup. ctes.

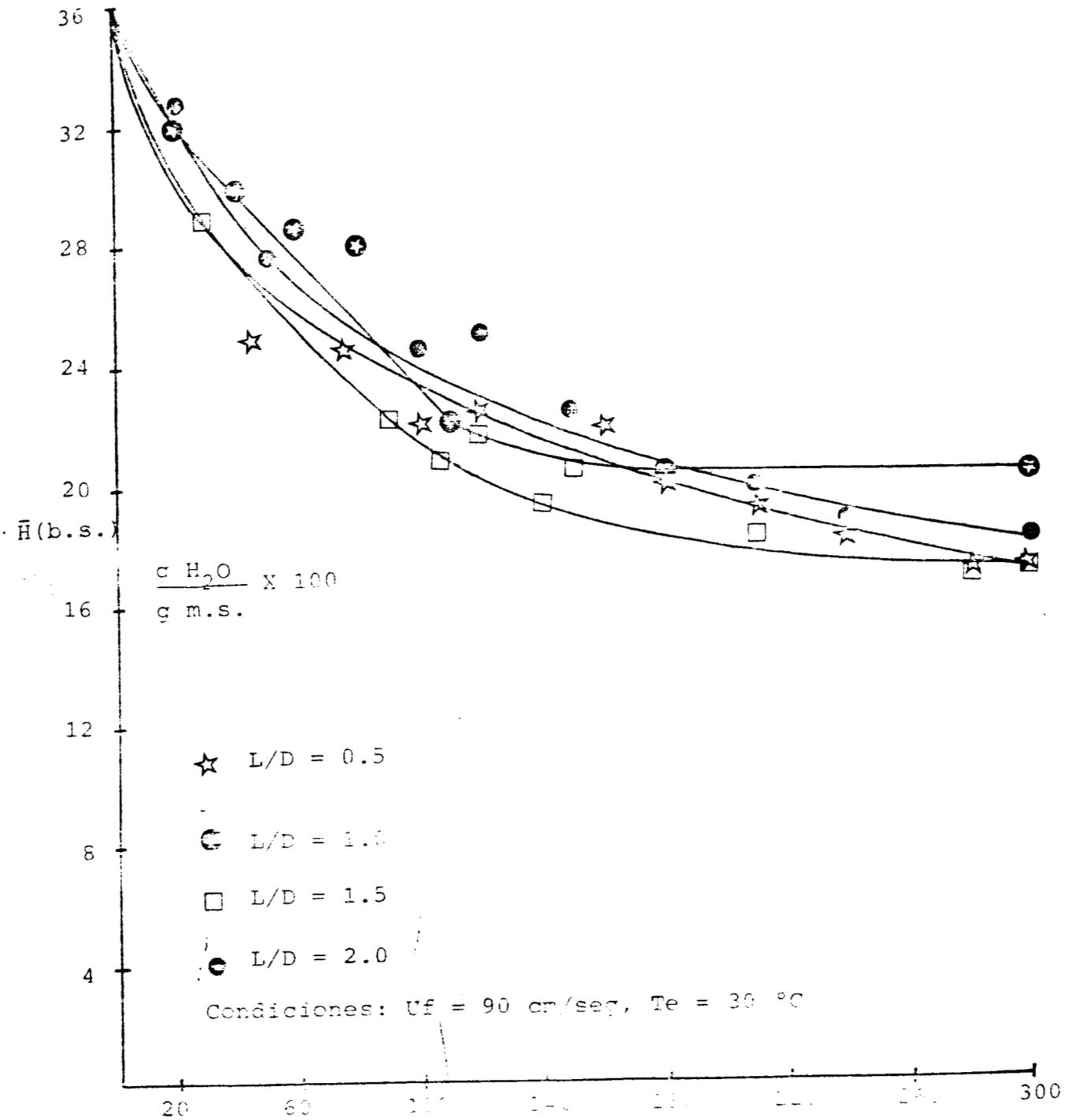


Fig. 12.- Variación del contenido de humedad del maíz con respecto al tiempo. Temperatura y velocidad sup. ctes.

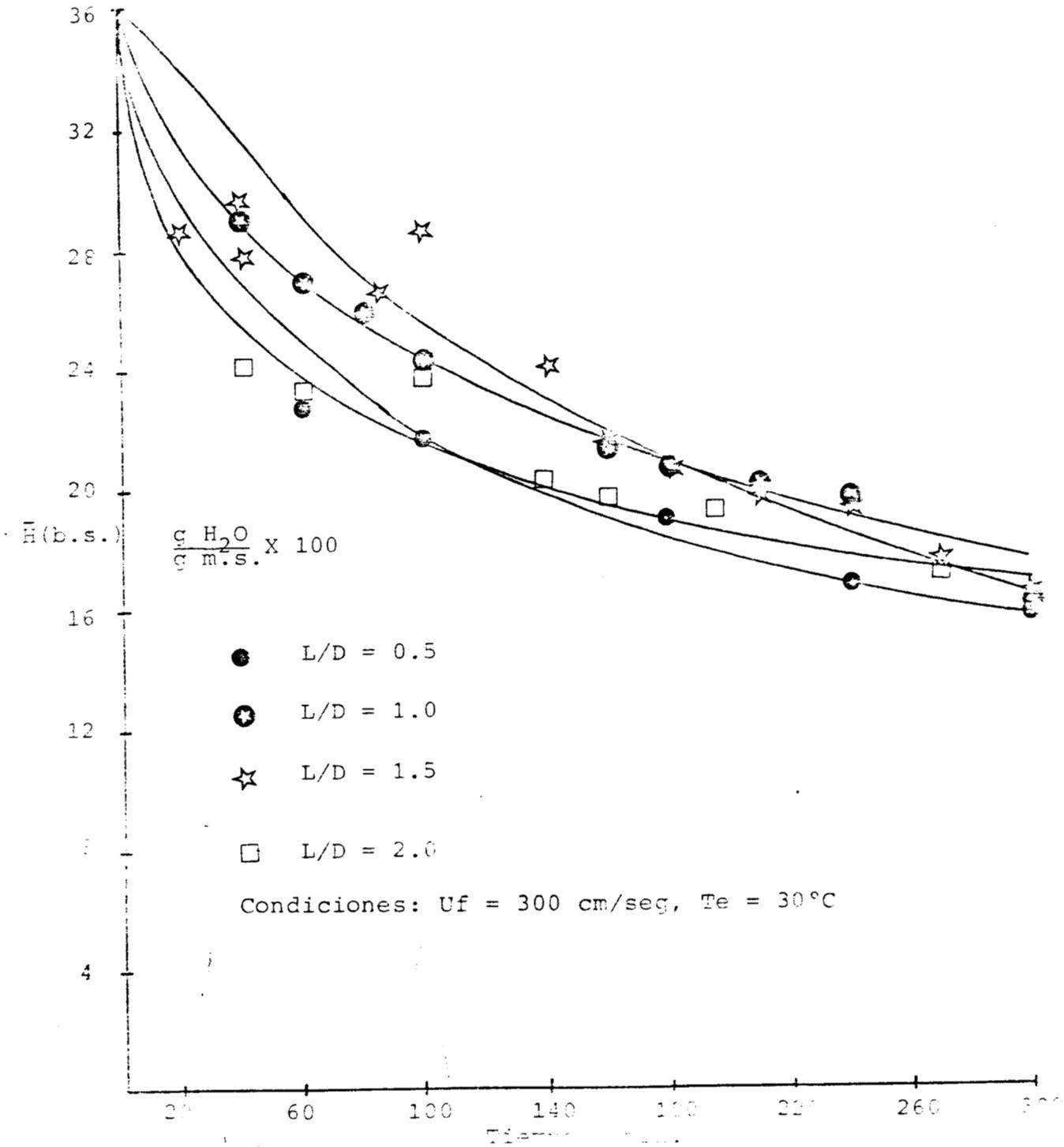


Fig. 13.- Variación del contenido de humedad del maíz con respecto al tiempo. Velocidad sup. y temperatura ctes.

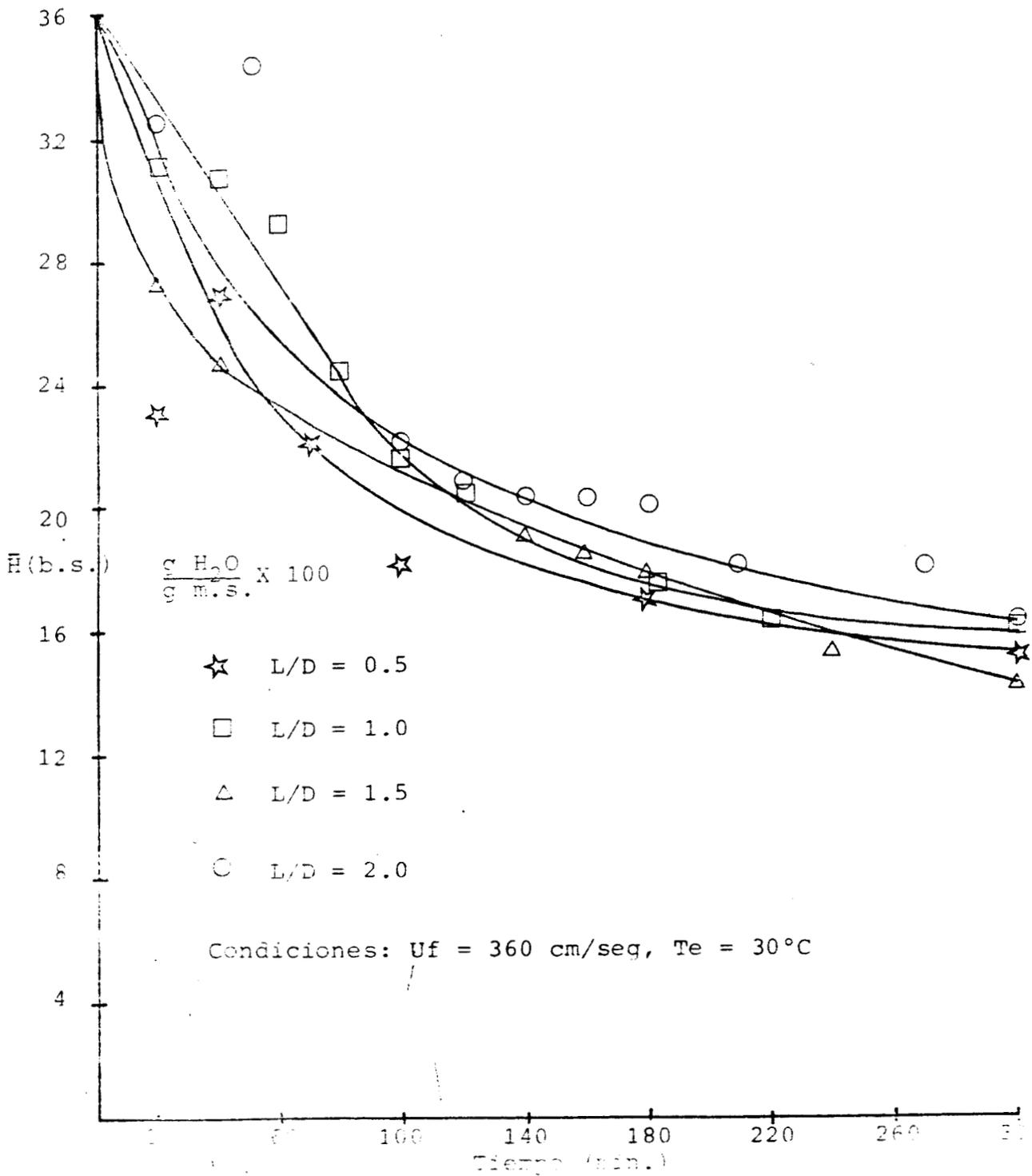
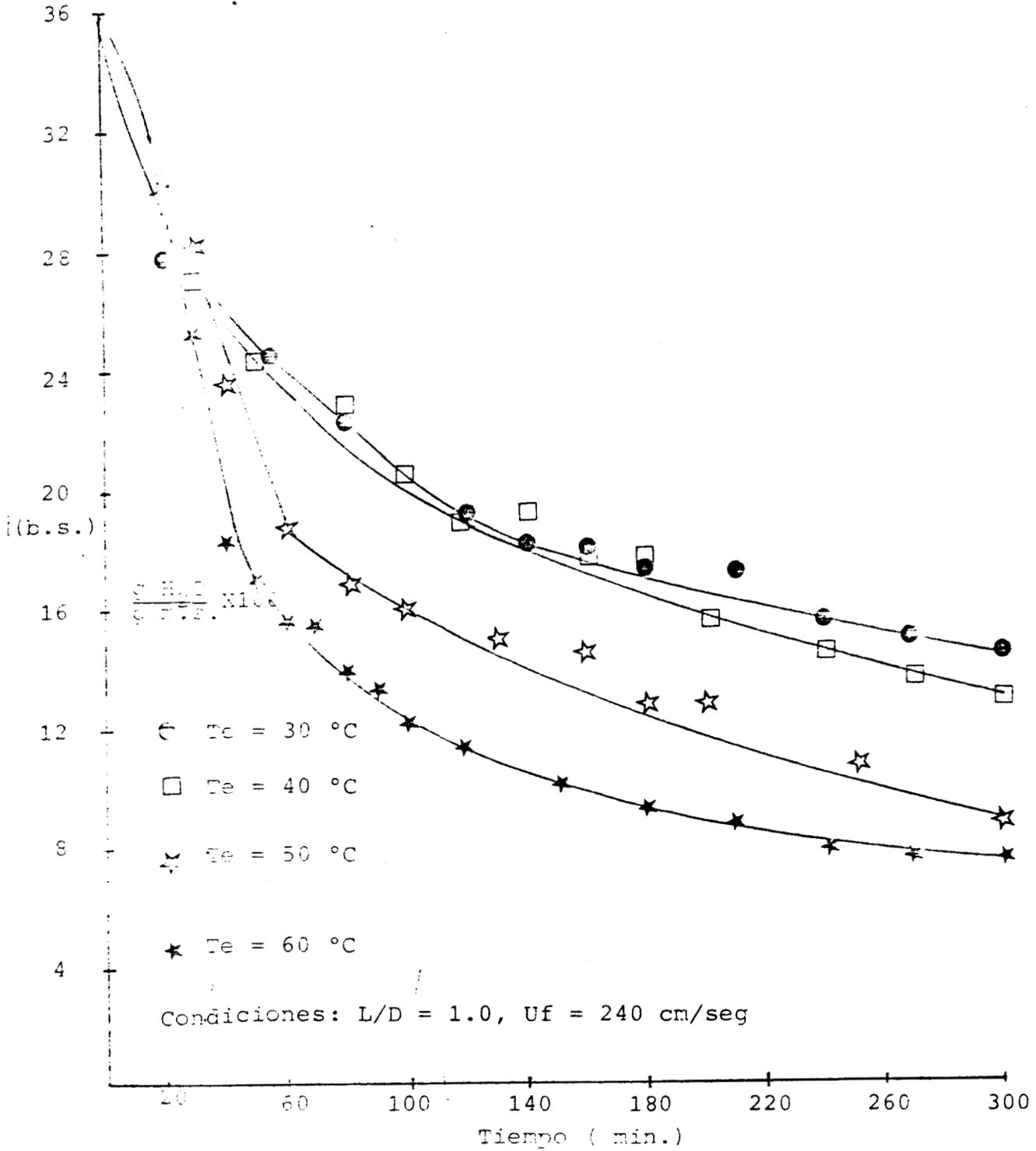


Fig. 14.- Variación del contenido de humedad del maíz con respecto al tiempo. Temperatura y velocidad sup. ctes.



Variación del contenido de humedad del mar con respecto al tiempo. Uf y L/D constantes.

el período decreciente, su poder de germinación puede verse afectado. Sin embargo, en pruebas sobre germinación efectuadas posteriores al secado, se pudo observar que la capacidad de germinación del grano no se vió afectada, y que tampoco se afectó la calidad nutricional del mismo, como se detalla posteriormente en el capítulo.

Asímismo, podemos decir que el considerable efecto de la temperatura sobre la velocidad de secado confirma que la difusión de masa es controlada por un mecanismo intra-particular.

MODELAMIENTO MATEMATICO DEL PERIODO DECRECIENTE DE SECADO. CALCULO DEL COEFICIENTE DE DIFUSION MOLECULAR PROMEDIO.

Debido a la complejidad con que se lleva a cabo la transferencia de masa del interior del sólido hacia la superficie externa del mismo, su estudio se dificulta y nos conduce a la necesidad de suponer un mecanismo que explique cómo se efectúa tal transferencia. Basados en la teoría de difusión molecular se puede establecer un camino que conduzca al cálculo del coeficiente de difusión, para lo cual se necesita tomar en cuenta las consideraciones de la sección 1.4.3.

En la Fig.1 del Apéndice D, se observa el resultado del modelo utilizado, para los siguientes casos:

- I.- Geometría esférica, resistencias externas despreciables y el primer término de la ecuación 1.22.
- II.- Geometría esférica, resistencias externas considerables y el primer término de la ecuación 1.24.
- III.- Considerando al maíz como un paralelepípedo, resistencias externas despreciables y el primer término de la ecuación 1.28.

En esta figura, correspondiente al análisis realizado para los datos experimentales de $L/D = 0.5$, U_f de 240 cm/seg y T_e de 30°C se observa que los casos I y III son los que mejor predicen el comporta

miento del maíz durante el período de velocidad decreciente de secado.

Ahora bien, ya que el maíz no tiene forma esférica, se procedió a comparar el modelo para las dos geometrías (esfera y paralelepípedo), considerando resistencias externas despreciables. Otro análisis se orientó a determinar el número máximo de términos significativos de las respectivas series correspondientes a las soluciones de cada geometría.

Para el cálculo del coeficiente de difusión y los valores de la función a los distintos intervalos de tiempo; se utilizó el programa UWHAUS de la Universidad de Wisconsin, este programa obtiene el mejor valor del parámetro a estimar, que en este caso es el coeficiente de difusión molecular.

El criterio para la consideración del número de términos en la serie fué el de el cálculo del coeficiente aumentando el número de términos y comparándolo con el valor anterior, hasta que ya no se obtuviera variación en el valor del coeficiente.

Por lo tanto la ecuación 1.22 toma la forma:

$$\frac{\bar{H} - H_e}{H_o - H_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^6 \frac{1}{n^2} \exp \left(- \frac{n^2 \pi^2 D_m}{R^2} \theta \right) \dots (3.3)$$

y la ecuación 1.28 queda:

$$\frac{\bar{H} - H_e}{H_o - H_e} = \frac{8^3}{\pi^6} \left[\sum_{n=0}^4 \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_m}{4x^2} \theta \right] + \sum_{n=0}^4 \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_m}{4y^2} \theta \right] \right] *$$

$$\sum_{n=0}^4 \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_m}{4z^2} \theta \right] \dots (3.4)$$

En la Tabla 7 se presentan los valores de los coeficientes de difusión molecular promedio evaluados mediante la regresión no-lineal para las dos geometrías, a las diferentes condiciones y a una temperatura de 30°C.

Como se puede observar, no existe un efecto considerable de la velocidad superficial del aire ni de la relación L/D. Sin embargo, existe una diferencia al utilizar geometrías distintas, pudiéndose observar, para todos los casos, que el valor del coeficiente de difusión calculado para la esfera es siempre del orden de un 50% mayor, en promedio, que en el caso del paralelepípedo.

Por lo anterior, si proponemos que existe una proporcionalidad entre ambos coeficientes podemos plantear la ecuación siguiente:

$$Dm_e = G Dm_p \dots (3.5)$$

donde, G, constante de proporcionalidad tiene un valor de 1.531, el cual se obtuvo dividiendo los valores de los coeficientes de difusión de cada geometría que se reportan en la misma tabla.

Ahora bien, podemos suponer que el valor de G depende de la geometría utilizada para el sólido y se puede proponer que:

$$\frac{A_e}{V_e} Dm_e = \frac{A_p}{V_p} Dm_p \dots (3.6)$$

donde A_e / V_e y A_p / V_p son las relaciones área/volumen para la

$D_m \times 10^7 \text{ (m}^2\text{/hr)}$

Te=30°C	Regresión no-lineal esfera.	Regresión no-lineal paralelepípedo.
L/D=0.5		
Uf (cm/seg)		
90	1.5750	1.0230
240	2.8140	1.8480
300	1.9820	1.2860
360	2.7690	1.8110
L/D=1.0		
Uf (cm/seg)		
90	1.1320	0.7271
240	2.6420	1.7400
300	1.3600	0.9012
360	1.8830	1.2240
L/D=1.5		
Uf (cm/seg)		
90	1.5760	1.0220
240	1.7390	1.1370
300	1.3700	0.9012
360	2.3050	1.4960
L/D=2.0		
Uf (cm/seg)		
90	1.3750	0.8909
240	2.0300	1.3182
300	1.9530	1.2720
360	1.6740	1.0930

Tabla 7 - Valores de los coeficientes de difusión molecular promedio para las dos geometrías estudiadas, calculados con el método.

esfera y el paralelepípedo respectivamente.

Si hacemos la evaluación de estas relaciones para cada una de las geometrías resulta que:

$$\frac{A_e}{V_e} = 9.83 \quad \text{y} \quad \frac{A_p}{V_p} = 12.576 \quad \dots(3.7)$$

Estos valores se calculan con los datos de diámetro de partícula equivalente y de las longitudes características correspondientes, los cuales se midieron experimentalmente. De este modo obtenemos un valor de G de 1.28.

La diferencia entre el valor calculado para G y el obtenido del promedio anteriormente señalado nos da una subestimación del 16.4%, con relación al coeficiente de difusión calculado para una esfera. Esta diferencia puede atribuirse al error experimental al llevar a cabo tales mediciones.

En la Fig.2 del Apéndice D se observa el resultado del modelo para $L/D = 0.5$, U_f de 240 cm/seg y $T_e = 30$ °C, para las dos geometrías, pudiéndose apreciar que no existe una diferencia considerable en la predicción de ambos. Por lo tanto, se optó por utilizar el modelo de difusión tomando al maíz como una esfera, considerando resistencias externas despreciables y 6 términos de la solución (ecuación 3.3). Esto se hizo debido a que dicha ecuación es mucho más sencilla que la ecuación 3.4, además de que es menos complicado considerar la difusión unidireccional. Así también, este resultado corrobora que el procedimiento experimental para la determinación del diámetro de partícula equivalente es adecuado.

En las Figs. 16 a 19 se muestran las curvas experimentales de humedad reducida vs. θ , para las diferentes condiciones de operación y aquellas correspondientes al ajuste del modelo de difusión molecular.

En estas figuras, no existe un efecto -

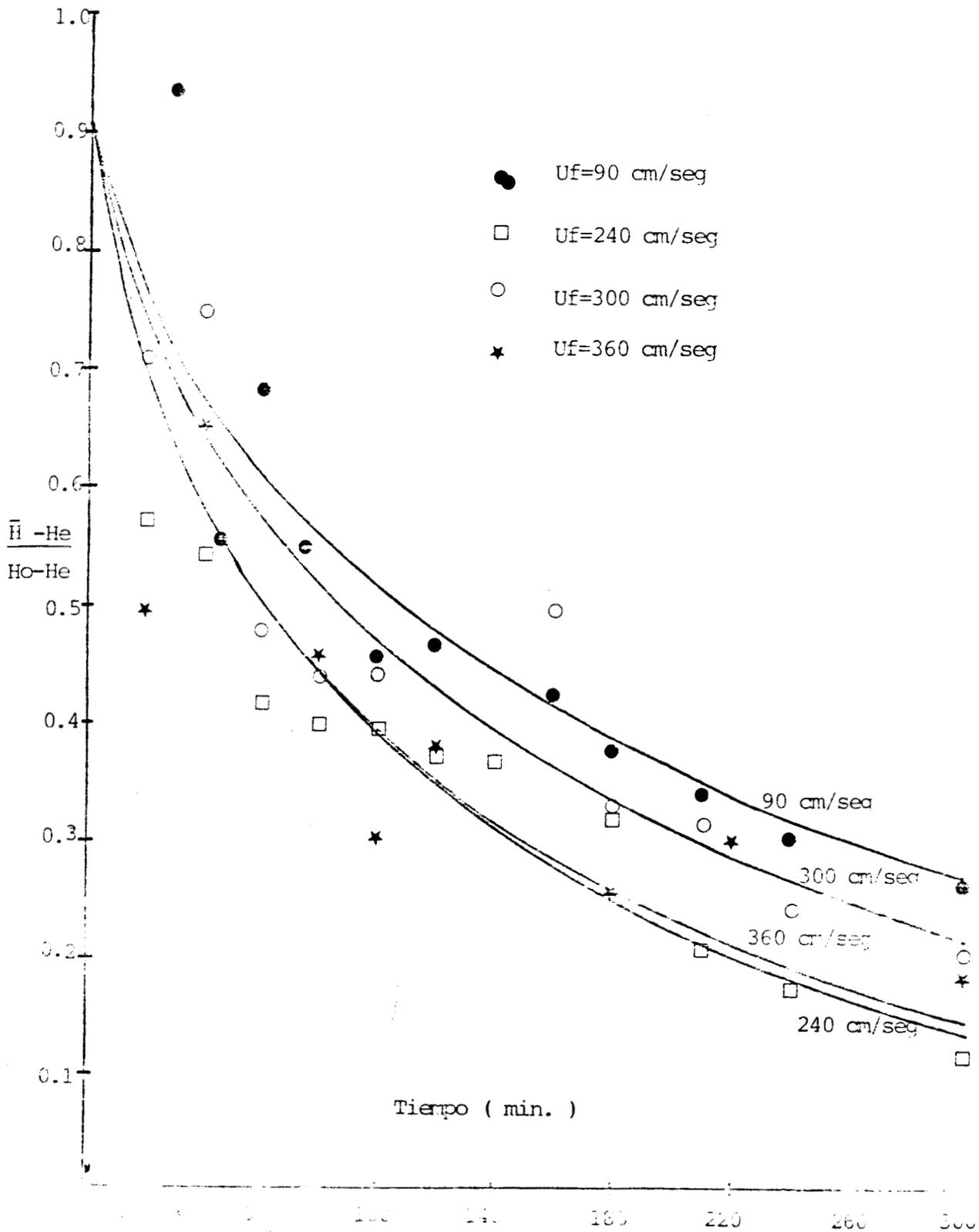


Fig. 14.- Variación de la humedad reducida con el tiempo: experimental y teórica. $L/D=0.5$ y $T_e=30^\circ\text{C}$.

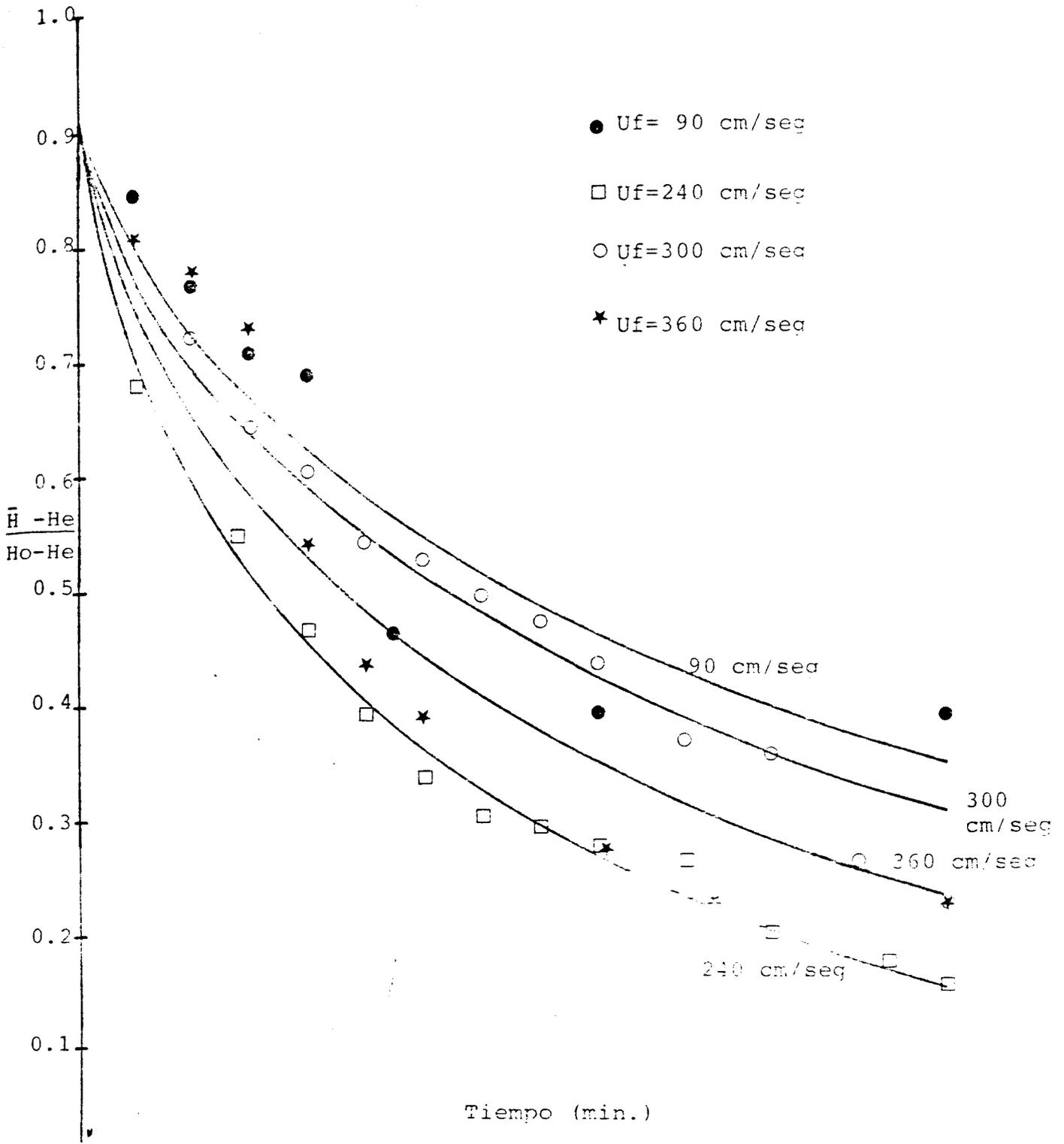


Fig.17.- Variación de la humedad reducida con el tiempo: experimental y teórica. $L/D=1.6$ y $T_a=30^\circ C$.

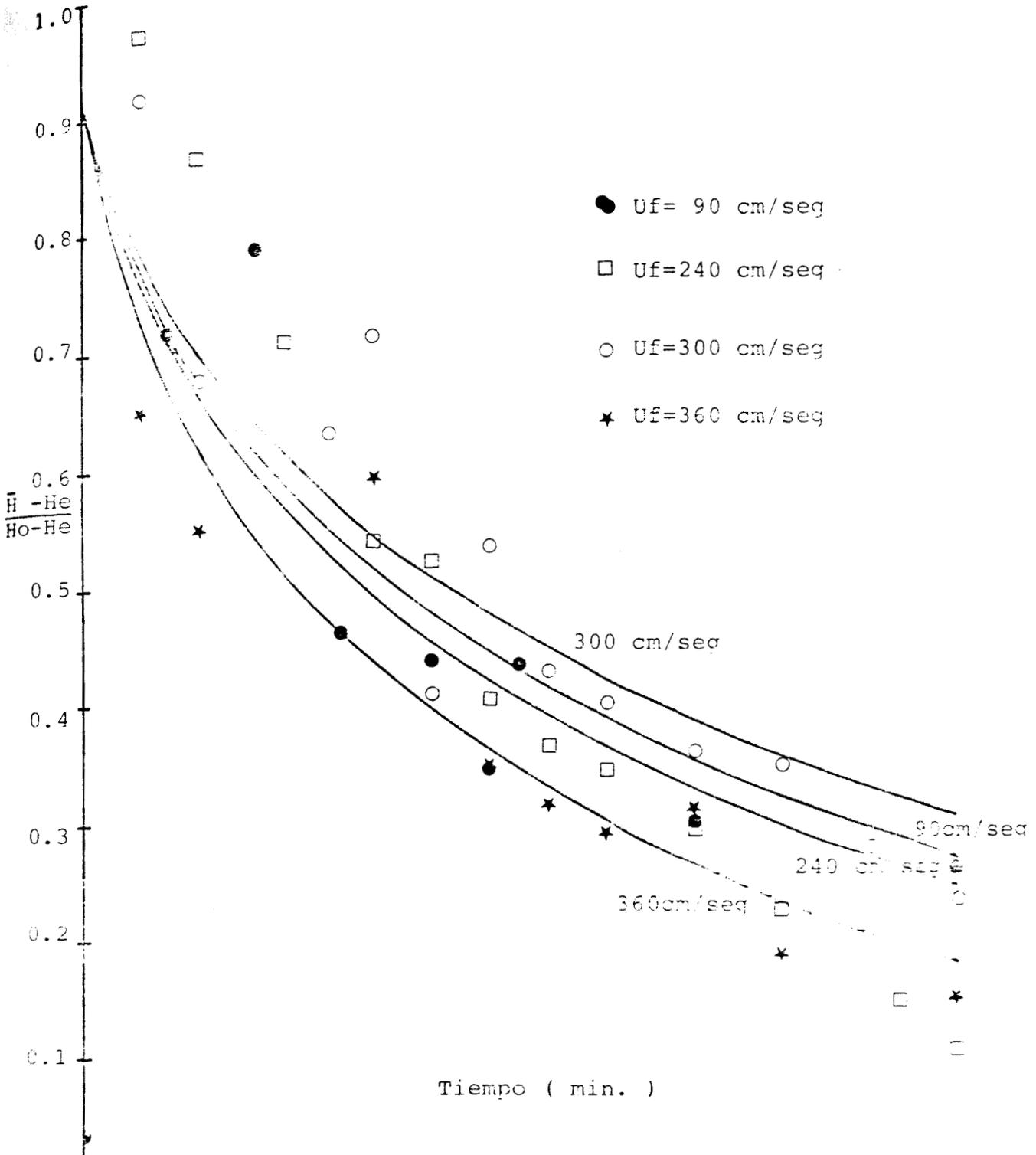


Fig.18.- Variación de la humedad reducida con el tiempo: experimental y teórica. $L/D=1.5$ y $T_e=30^\circ\text{C}$.

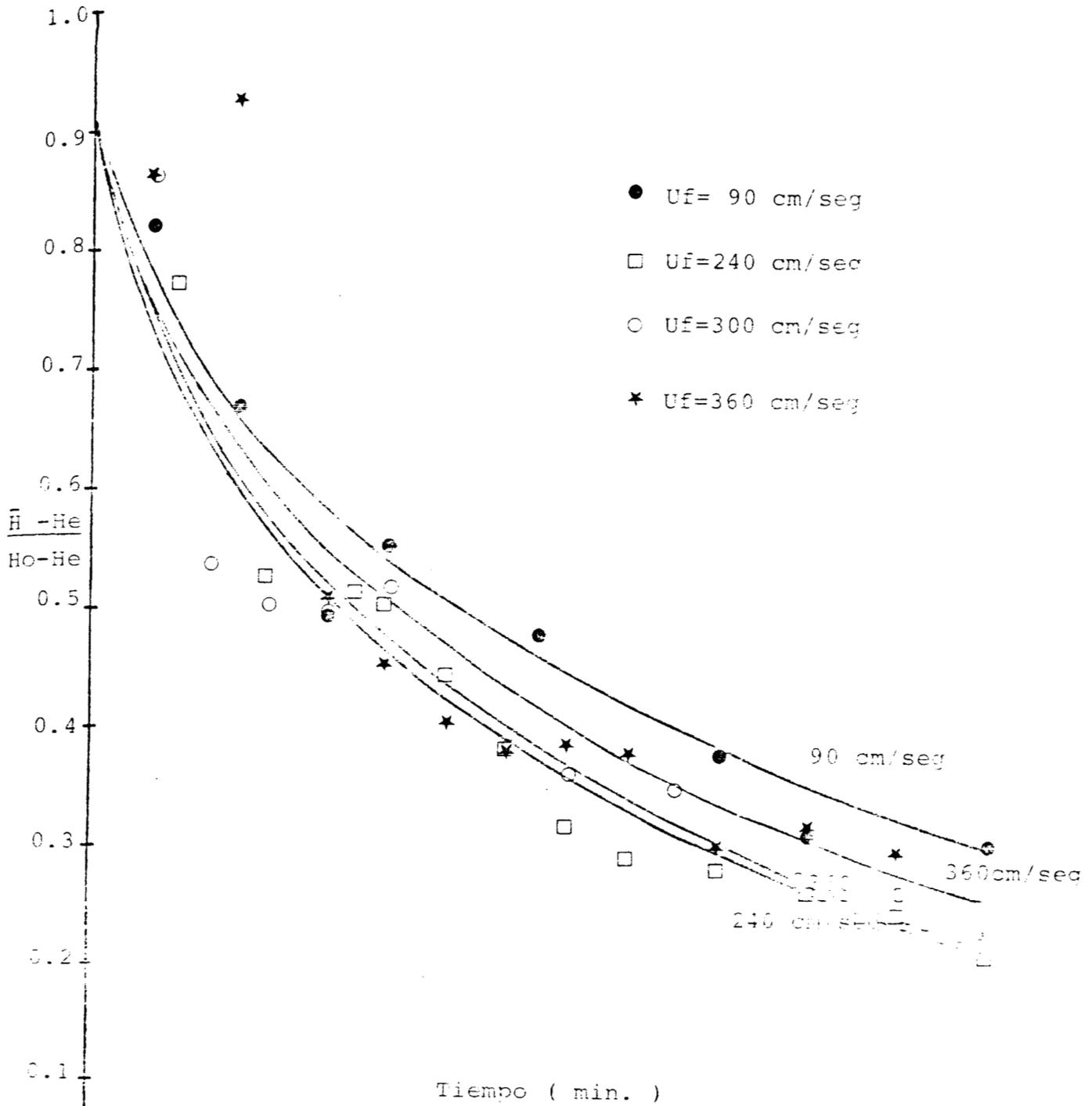


Fig.19.- Variación de la humedad reducida con el tiempo: experimental y teórica. $L/D=2.0$ y $T_e=30^\circ\text{C}$.

notable de la velocidad superficial del aire ni de la relación L/D sobre la velocidad de secado ni sobre la estimación del coeficiente de difusión, como se puede comprobar con los resultados que se presentan en la Tabla 7.

No obstante, la temperatura, como ya se mencionó anteriormente, es el parámetro que tiene mayor efecto sobre el coeficiente de difusión (Fig.20). Esto último se comprueba con los valores de estos coeficientes mostrados en la Tabla 8, en donde se observa que un aumento en la temperatura produce un aumento en el valor del coeficiente de difusión.

Cabe señalar que los valores de estos coeficientes concuerdan con algunos reportados en la literatura⁽²¹⁾ para el secado de maíz con aire caliente.

Los datos calculados para la construcción de las Figs.16 a 20 se localizan en las Tablas 21 a 25 del Apéndice C.

Con los resultados anteriores, podemos afirmar que el coeficiente de difusión molecular promedio, calculado a partir del modelo esférico, nos proporciona una buena descripción de las condiciones - experimentales estudiadas.

Por último, tomando en cuenta la dependencia del coeficiente de difusión molecular con la temperatura, se propone correlacionar esta funcionalidad a través de un modelo tipo Arrhenius:

$$D_m = M \exp (- E/RT) \quad \dots(3.8)$$

Linealizando tal ecuación nos quedaría:

$$\ln D_m = \ln M - E/RT \quad \dots(3.9)$$

de modo que si graficamos $\ln D_m$ vs $1/T$ podemos obtener el valor de las constante M y E , donde E representa la energía de activación del

$D_m \times 10^7 \text{ (m}^2/\text{hr)}$

L/D=1.0, Uf=240(cm/seg)	Regresión no-lineal esfera.	Regresión no-lineal paralelepípedo.
Tc(°C)		
30	2.6420	1.7400
40	2.5280	1.6590
50	4.1250	2.7130
60	6.0830	4.0330

Tabla 8.- Valores de los coeficientes de difusión molecular promedio para las dos geometrías estudiadas, calculados con el UMHAUS. Variación del coeficiente con la temperatura.

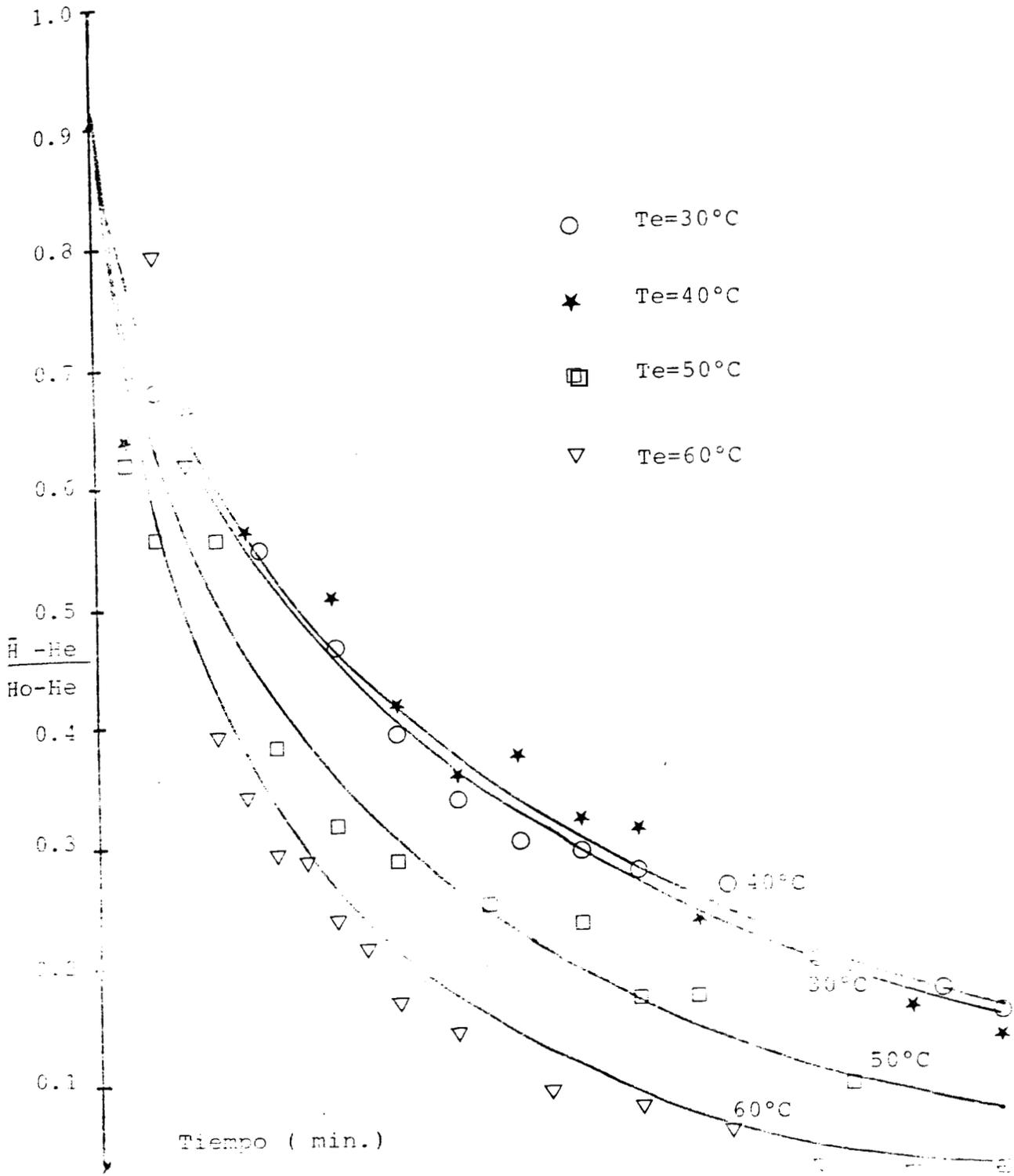


Fig. 12.- Variación de la humedad reducida con el tiempo: experimental y teórica. $L/D=1.0$ $Uf=110$ m/s.

sistema.

Los resultados así obtenidos se muestran en la Fig.21, donde se puede observar que los puntos experimentales siguen la tendencia lineal que se esperaba. Los valores de M y E obtenidos mediante la ecuación 3.9 utilizando mínimos cuadrados fueron:

$$M = 0.7667 \text{ cm}^2/\text{min}$$

$$E = 5963.43 \text{ cal/gmol}$$

3.4.- EVALUACION DEL GRADO DE DESINFESTACION.

Todas las muestras de maíz infestadas artificialmente con insectos adultos de la especie S. zeamais y almacenadas a 61±3% H.R. y 27±1°C, desarrollaron hongos y levaduras durante el período de incubación previo a su tratamiento en el lecho fluidizado.

Independientemente de las condiciones a que fueron sometidas las muestras (Tabla 3) en el lecho fluidizado, se logró la separación y arrastre de todos los insectos adultos y una gran mayoría de microorganismos. Este fenómeno fué tan rápido que no fué posible modelarlo matemáticamente. Sin embargo, se logró evaluar indirectamente el efecto de la separación del insecto, hongos y levaduras en la calidad final del maíz mediante la cuantificación de las pérdidas sufridas por éste, en carbohidratos totales disponibles, proteína cruda y peso.

En la Fig.22 se presenta el contenido de carbohidratos totales disponibles en el maíz en la muestra testigo (sin tratamiento), y en las muestras tratadas a los 7 días de su infestación con respecto al tiempo de almacenamiento.

Se puede observar que el tipo de tratamiento a que se someten

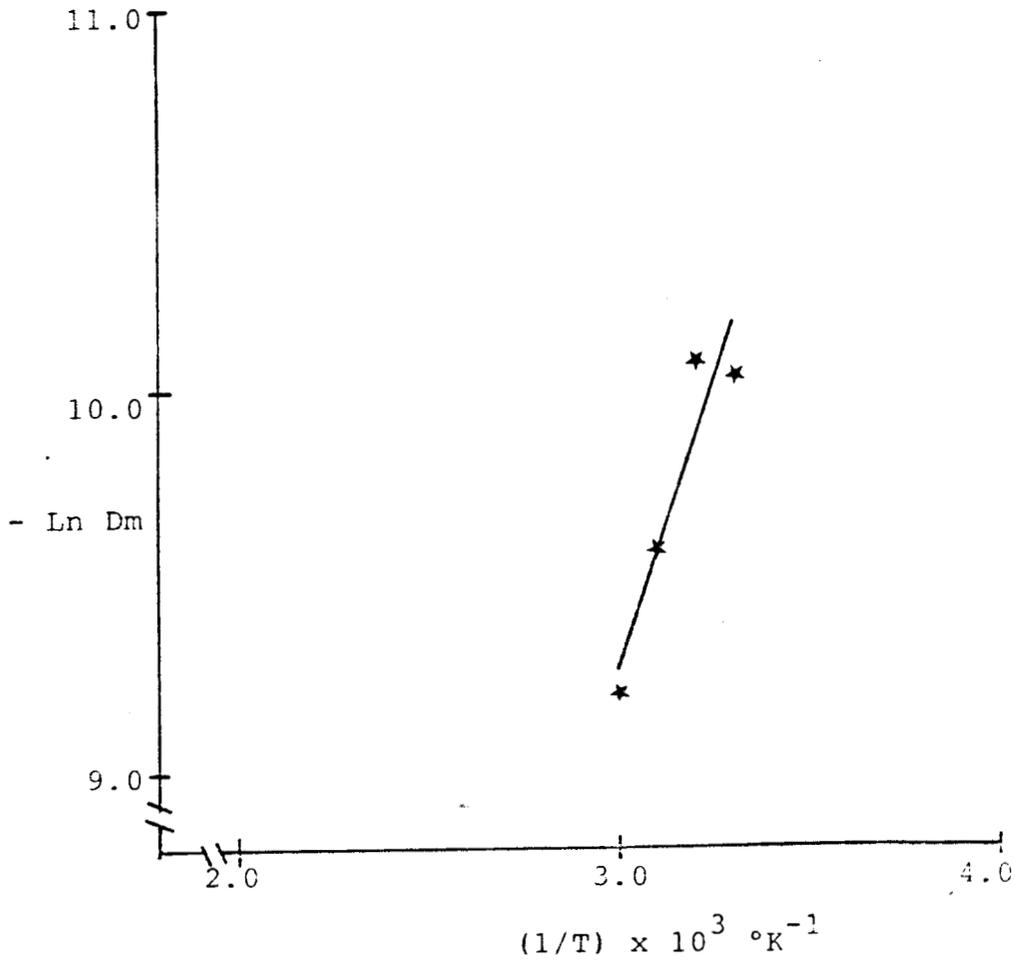


Fig.21.- Variación del coeficiente de difusión con -
la temperatura. Ecuación tipo Arrhenius. Ex-
perimental y teórica.

las muestras tiene una influencia notable en el contenido final de carbohidratos en el maíz. Así pues, la pérdida de carbohidratos en la muestra sin tratar fué del 62.2% con respecto al contenido inicial de éstos después de 45 días de su almacenamiento. Este nivel de pérdidas resultó muy superior que para el caso de cualquiera de las muestras tratadas. Un análisis de los datos obtenidos para estos últimos, indica que el peor tratamiento resultó ser aquel que se realizó a 30°C y en el que se disminuyó el contenido de humedad en el grano al 14% (b.s.), habiéndose perdido el 29.16 % del contenido inicial de carbohidratos totales disponibles al cabo de 45 días. A este tratamiento le siguieron de menor a mayor eficiencia los tratamientos a 30°C y $H_F = 10\%$ (b.s.); 60°C y $H_F = 14\%$ (b.s.); y 60°C y $H_F = 10\%$ (b.s.), respectivamente. Para el último tratamiento, las pérdidas en carbohidratos totales disponibles fueron del 16% - con respecto al contenido inicial.

Estos resultados indican que tanto la humedad final en el grano como la temperatura de operación en el lecho fluidizado tienen una marcada influencia en la calidad del grano al final del período de incubación, y por ende en el grado de desinfestación.

Aparentemente la diferencia en los tratamientos reside en el hecho de que, a pesar de que en todos se logra separar el total de insectos adultos y una gran mayoría de microorganismos, solamente en los tratamientos realizados a 60°C se logra inhibir el crecimiento larvario de los insectos, y al final del período de incubación de 45 días, en los tratamientos efectuados a 30 °C, emergieron nuevos insectos adultos.

Para los tratamientos a 60°C se puede observar que las pérdidas en carbohidratos que sufrieron los granos del día 7 al 45, son relativamente pequeñas, comparadas con aquellas ocurridas en los tratamientos a 30 °C en donde se observan pérdidas más notables en carbohidratos totales en el mismo período, lo que indica que las larvas y los nuevos insectos surgidos están consumiendo para su mantenimiento los carbohidratos que se encuentran en el grano.

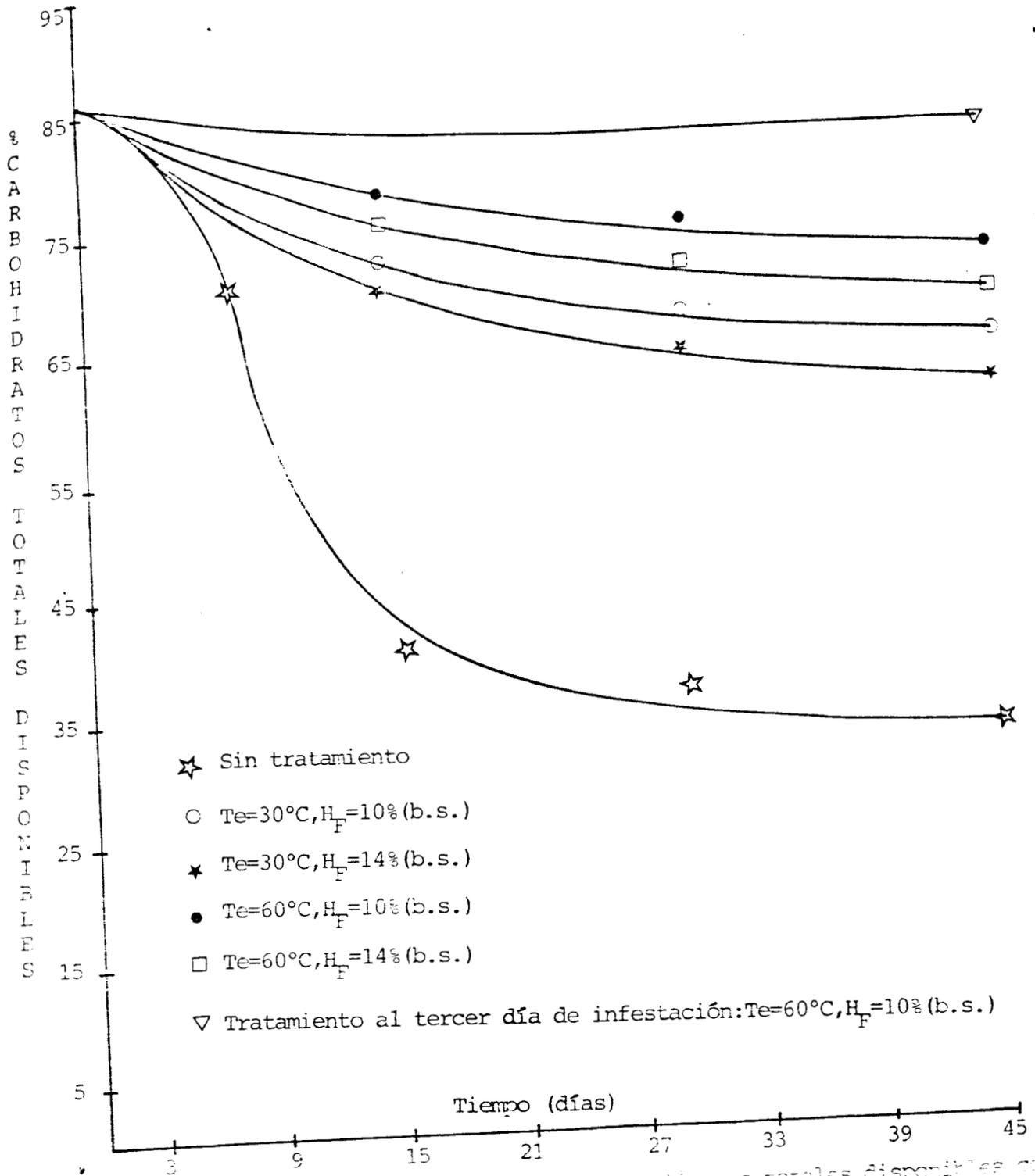


Fig. 1.- Variación del contenido de carbohidratos totales disponibles con respecto al tiempo de almacenamiento a temperatura constante de 27± 1°C. H.R. y 27± 1°C. (Datos en base seca).

En la misma Fig.22 se presenta una curva que corresponde a una muestra tratada a 60 °C y $H_F = 10 \%$ (b.s.) a los tres días de su infestación.

Claramente se observan dos aspectos:

- a).- Las pérdidas en carbohidratos totales disponibles para este tratamiento son muchísimo menores que las comparadas con los otros tratamientos y,
- b).- No hay cambio en el contenido de carbohidratos después del tratamiento del grano durante su almacenamiento.

Estos resultados enfatizan la importancia que tiene el tiempo en que tarda en aplicarse el proceso de acondicionamiento después de la infestación de la muestra.

En términos generales, las tendencias observadas en las pérdidas de carbohidratos son similares a los resultados obtenidos para pérdidas de proteína cruda y en peso de los granos.

En la Fig.23 se presenta el resultado de la evaluación de proteína cruda para los diferentes lotes de maíz. Se observa que las pérdidas de proteína cruda en el grano sin tratar, al final del período de almacenamiento, fueron del 22 % (b.s.), mientras que en el grano tratado a 60 °C y $H_F = 10\%$ (b.s.), la disminución en el contenido de proteína cruda es del 1.6 % (b.s.). Es decir, que se evitó en un 92% la pérdida de proteína cruda entre el maíz sin tratamiento y el acondicionado a 60 °C y $H_F = 10 \%$ (b.s.).

Aún en el caso del tratamiento que arrojó los resultados menos favorables (30 °C y $H_F = 14 \%$ (b.s.)), la disminución en el contenido de proteína cruda después del período de almacenamiento fué de 3.97 %, lo cual representa una retención de 82% mayor con respecto al maíz sin tratamiento.

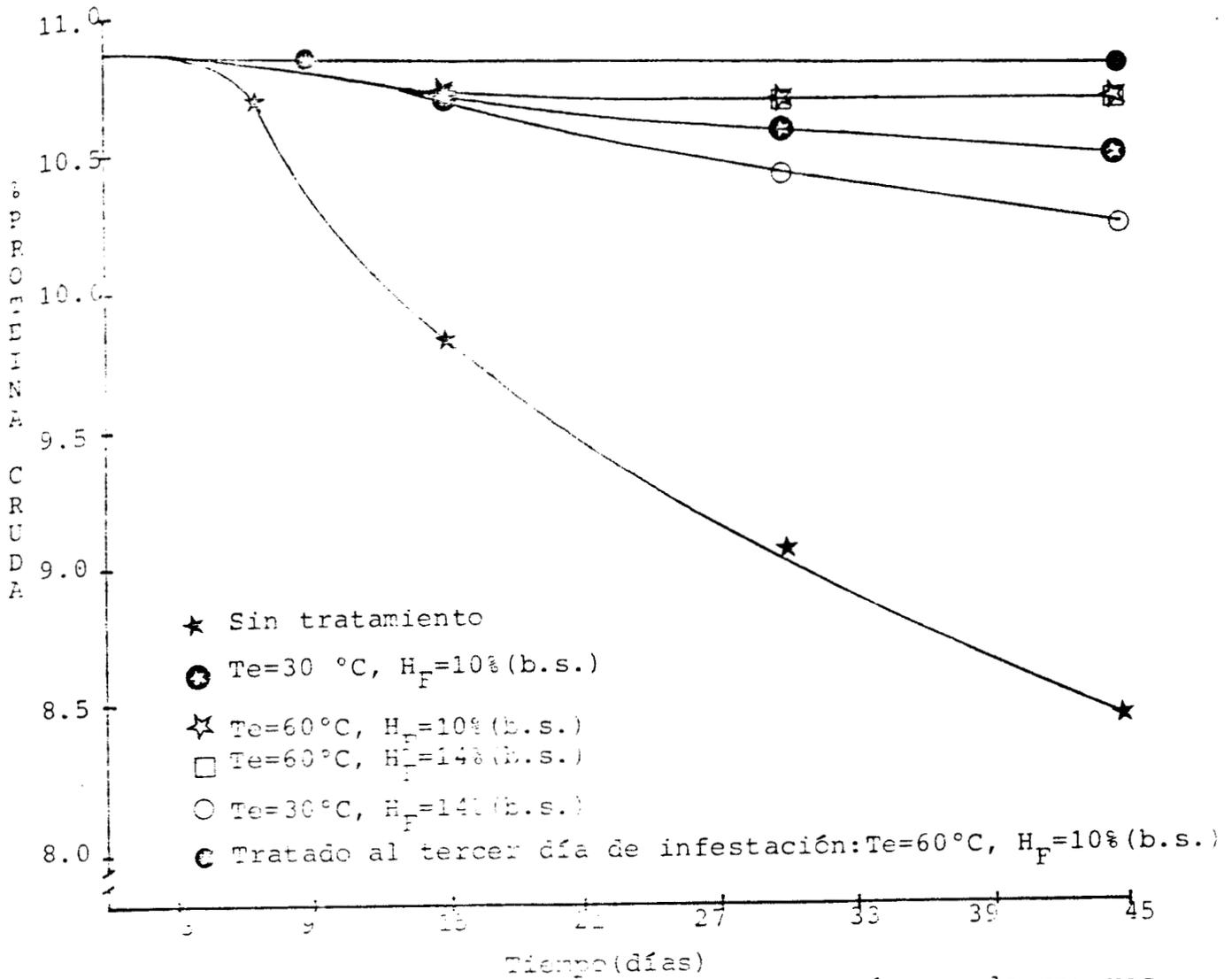


Fig. 23.- Variación del contenido de proteína cruda con respecto al tiempo de almacenamiento. Condiciones de almacén: 61-3 % H.R., 27-1°C. (Datos en base seca).

De la misma manera se puede afirmar que así como las condiciones a las que se trató el maíz tuvieron influencia sobre el grado de desinfestación evaluado en función del contenido energético, éstas también tuvieron influencia sobre el contenido total de proteína cruda.

En la Tabla 26 del Apéndice C se reportan los datos primarios utilizados para la construcción de la Figs. 22 y 23.

En cuanto a las pérdidas en peso sufridas por el maíz se observa que para el grano sin tratar, éstas fueron del 24 % con respecto al peso inicial (Tabla 9), mientras que para el tratamiento a 60° y $H_F=10\%$ (b.s.) las pérdidas fueron del 0.84 % (Tabla 10).

Estas pérdidas en peso son ocasionadas por los insectos adultos y sus larvas que se alimentan del grano (Apéndice B.1). Sin embargo, aún más impactante, es la pérdida real del grano sin tratar referida a la cantidad de maíz dañado por diversas causas, como lo es la proliferación de hongos y levaduras, que confieren un aspecto desagradable y riesgos sanitarios al producto, con el consecuente rechazo por parte de los eventuales consumidores. Estas pérdidas fueron del 93% para el grano sin tratamiento.

A pesar de no haberse logrado inhibir el crecimiento larvario, el efecto del tratamiento es notable en cuanto a la reducción en las pérdidas reales que sufre el grano con respecto al maíz no tratado. Así pues, se observa que estas pérdidas fueron de tan solo - 7.5% para el tratamiento a 60°C y $H_F=10\%$ (b.s.), mientras que para el tratamiento a 30°C y $H_F=14\%$ (b.s.) fueron del 77% (Tabla 11), lo cual representa una preservación del 93 y del 17% respectivamente, relativo al maíz sin tratar.

Los resultados de estas pérdidas para los tratamientos llevados a cabo a 30°C y $H_F=10\%$ (b.s.) y 60°C y $H_F=14\%$ (b.s.) se presentan en las Tablas 12 y 13 y son, del 15 % para el primero y, del 16.7% para el segundo.

Esto nos indica claramente, que el efecto del procesamiento es

TIEMPO (DIAS)

FRACCIONES	0		15		30		45	
	Peso (g)	%	Peso(g)	%	Peso (g)	%	Peso(g)	%
No picado	40.44	100	13.83	34.20	3.91	9.67	2.80	6.90
Picado	0.0	0	7.74	19.14	14.48	35.80	13.50	33.40
Polvo	0.0	0	0.52	1.28	0.61	1.51	0.80	1.98
Dañado por hongos y levaduras	0.0	0	13.48	33.33	14.43	35.68	14.43	35.68
TOTAL	40.44	100	35.57	87.95	33.43	82.66	31.53	77.96

Tabla 9.- Fracciones en peso de los diferentes daños causados al maíz para distintos períodos de almacenamiento. Condiciones de almacén: 61±3% H.R., 27±1°C . Datos para la construcción de las Figs. 24 a 26.(Datos en base seca). Maíz control sin tratamiento en el techo flujado.

TIEMPO (DIAS)

FRACCIONES	0		15		30		45	
	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso(g)	%
No picado	40.44	100	37.50	92.73	37.40	92.48	37.40	92.48
Picado	0.0	0	1.20	2.97	1.20	2.97	1.20	2.97
Polvo	0.0	0	0.10	0.25	0.10	0.25	0.10	0.25
Dañado por hongos y levaduras	0.0	0	1.50	3.70	1.50	3.70	1.50	3.70
TOTAL	40.44	100	40.30	99.65	40.20	99.40	40.20	99.40

Tabla 10.- Fracciones en peso de los diferentes daños causados al maíz para distintos períodos de almacenamiento. Maíz tratado en el techo fluidizado a $T_e=60^\circ\text{C}$ y $H_F=10\%$ (b.s.). Condiciones de almacén: $61\pm 3\%$ H.R., $27\pm 1^\circ\text{C}$. Datos para la construcción de las Figs. 24 a 26. (En base seca).

TIEMPO (DIAS)

FRACCIONES	0		15		30		45	
	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso(g)	%
No picado	40.44	100	20.95	51.80	13.95	34.50	9.30	23.00
Picado	0.0	0	4.40	10.88	5.85	14.46	6.87	17.00
Polvo	0.0	0	0.10	0.25	0.12	0.30	0.13	0.32
Dañado por hongos y leyaduras	0.0	0	10.50	15.97	14.85	36.72	17.39	43.00
TOTAL	40.44	100	35.95	88.90	34.77	85.98	33.69	83.32

Tabla 11.- Fracciones en peso de los diferentes daños causados al maíz para distintos períodos de almacenamiento. Maíz tratado en el lecho fluidizado a $T_e=30^\circ\text{C}$, $H_F=14\%$ (b.s.). Condiciones de almacén: $61\pm 3\%$ H.R. y $27 \pm 1^\circ\text{C}$. Datos para la construcción de las Figs'24 a 26. (En base seca).

TIEMPO (DIAS)

FRACCIONES	0		15		30		45	
	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso(g)	%
No picado	40.44	100	28.50	70.47	22.50	55.60	18.40	45.50
Picado	0.0	0	3.60	8.90	5.60	13.48	8.80	21.76
Polvo	0.0	0	0.50	1.24	0.60	1.48	0.70	1.73
Dañado por hongos y levaduras	0.0	0	6.50	16.09	6.50	16.09	6.50	16.09
TOTAL	40.44	100	39.10	96.70	35.20	86.65	34.40	85.08

Tabla 12.- Fracciones en peso de los diferentes daños causados al maíz para distintos períodos de almacenamiento. Maíz tratado en el lecho fluidizado a $T_e=30^{\circ}\text{C}$ y $H_F=10\%(\text{b.s.})$. Condiciones de almacén: $61 \pm 3\%$ H.R., $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Datos para la construcción de las Figs.24 a 26. (En base - seca).

TIEMPO (DIAS)

FRACCIONES	0		15		30		45	
	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso(g)	%
No picado	40.44	100	34.50	85.31	34.40	85.06	34.40	85.06
Picado	0.0	0	2.10	5.20	2.10	5.20	2.10	5.20
Polvo	0.0	0	0.10	0.24	0.10	0.24	0.10	0.24
Dañado por hongos y levaduras	0.0	0	3.10	7.66	3.10	7.66	3.10	7.66
TOTAL	40.44	100	39.80	98.41	39.70	98.16	39.70	98.16

Tabla 13.- Fracciones en peso de los diferentes daños causados al maíz para distintos períodos de almacenamiento. Maíz tratado en el lecho fluidizado a $T_e=60^\circ\text{C}$ y $H_F=14\%$ (b.s.). Condiciones de almacén: $61\pm 3\%$ H.R., $27\pm 1^\circ\text{C}$. Datos para la construcción de las Figs. 24 a 26. (En base seca).

de suma importancia, aún en las condiciones menos favorables.

En la Fig.24 se presentan los datos del maíz que permanece sin picaduras durante el período de almacenamiento. Son estos resultados los que nos permiten visualizar más claramente el efecto del tratamiento sobre la desinfestación e inhibición de los insectos y sus larvas.

Es evidente que el maíz sin tratar sufre una pérdida casi total. Por otro lado, también es notable el efecto de la temperatura de operación y de la humedad final en el grano. Los tratamientos a 60°C logran prácticamente frenar la cantidad de granos picados a partir del quinceavo día de almacenamiento de los granos desde su infestación artificial.

Este resultado parece indicar, que aunque el tratamiento logra separar los insectos adultos, no logra inhibir en su totalidad el crecimiento larvario. Sin embargo, como se mencionó con anterioridad, parece que el tratamiento impide que las larvas sobrevivientes se desarrollen en insectos adultos, y por lo tanto, al final del período de incubación no se encontraron éstos.

El caso de los tratamientos a 30°C es distinto, ya que aunque el tratamiento se refleja en la preservación del grano, las pérdidas siguen siendo extensas. Esto es indicativo de que el tratamiento no tiene efecto sobre las larvas y que éstas logran desarrollarse en insectos adultos, consecuentemente causando las pérdidas observadas.

Los resultados reportados en la Fig.25 tienden a enfatizar este resultado. Aquí se muestran las curvas obtenidas de graficar el porcentaje de maíz dañado por hongos durante el período de almacenamiento.

Nuevamente se observa que cerca de un 40% del maíz sin tratar es infestado por estos microorganismos. Sin embargo, los tratamientos a 60°C prácticamente inhiben su crecimiento, aunque hay que manifestar que el contenido de humedad final en el grano juega un papel -

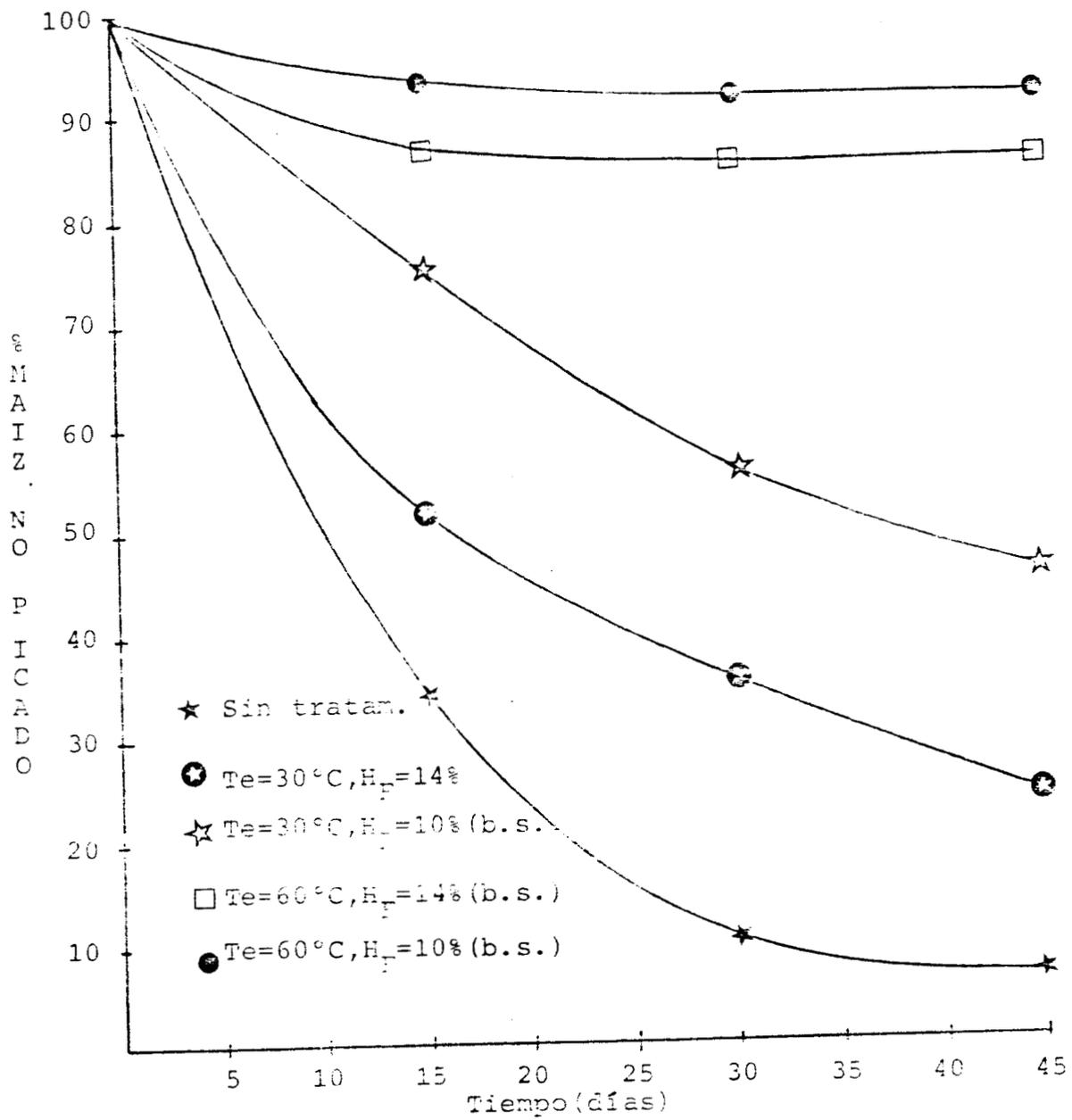


Fig. 24.- Porcentaje de maíz no picado (ssno) con res-
puesta a diferentes tratamientos de conservación.
Data: 1958.

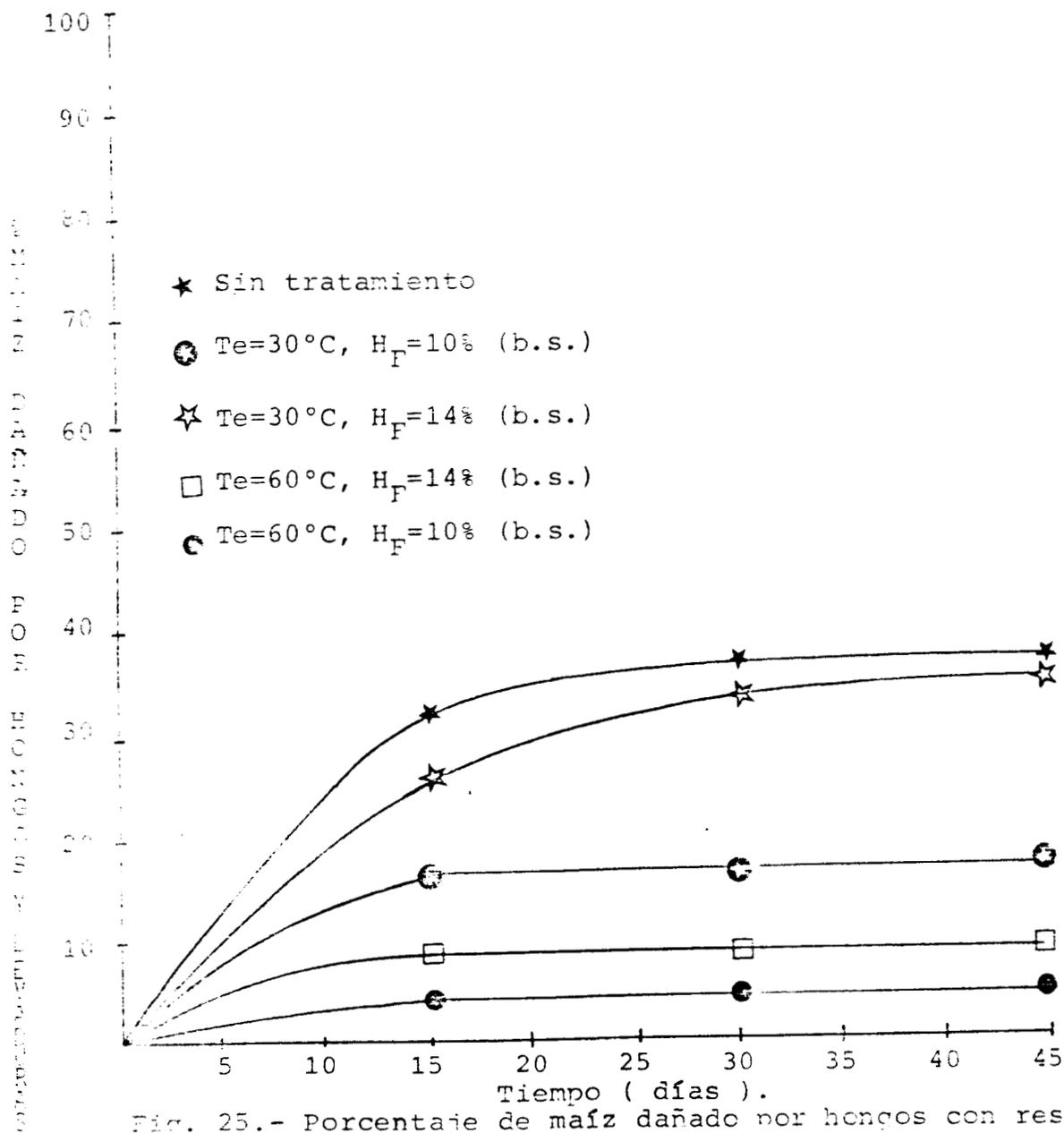


Fig. 25.- Porcentaje de maíz dañado por hongos con respecto al periodo de almacenamiento. (Datos en base seca).

preponderantemente en el desarrollo de los microorganismos previo al tratamiento del maíz a 60 °C.

Se observa en la Fig.25, que después del tratamiento a 60 °C los hongos no proliferan durante el almacenamiento, pero su crecimiento previo al tratamiento fué del doble para la muestra secada al 14 % (b.s.) que para la muestra secada al 10 % (b.s.).

La importancia de la humedad se ve claramente con el tratamiento a 30 °C. La muestra secada al 10 % (b.s.) vió inhibido el desarrollo de los hongos durante su almacenamiento, mientras que en la muestra secada hasta el 14 % (b.s.) proliferaron estos microorganismos triplicándose la infestación del grano del día 7 al 45.

En la Fig.26 se observan los resultados para el porcentaje del grano picado vs. tiempo de incubación, y puede apreciarse que sólo para los tratamientos a 60 °C, este porcentaje permanece constante desde los 15 hasta los 45 días.

Los datos utilizados para la construcción de las figuras 24 a 26 se encuentran reportados en las Tablas 9 a 13.

De esta manera, podemos afirmar, que bajo condiciones adecuadas de operación, el lecho fluidizado constituye un buen método de secado y desinfestación, que proporciona un buen acondicionamiento al maíz.

Asímismo, los resultados muestran que la temperatura tiene un efecto muy importante sobre este proceso, así como también el tiempo que tarda en llevarse a cabo el acondicionamiento después de infestada la muestra y el nivel a que se baja el contenido final de humedad en el grano.

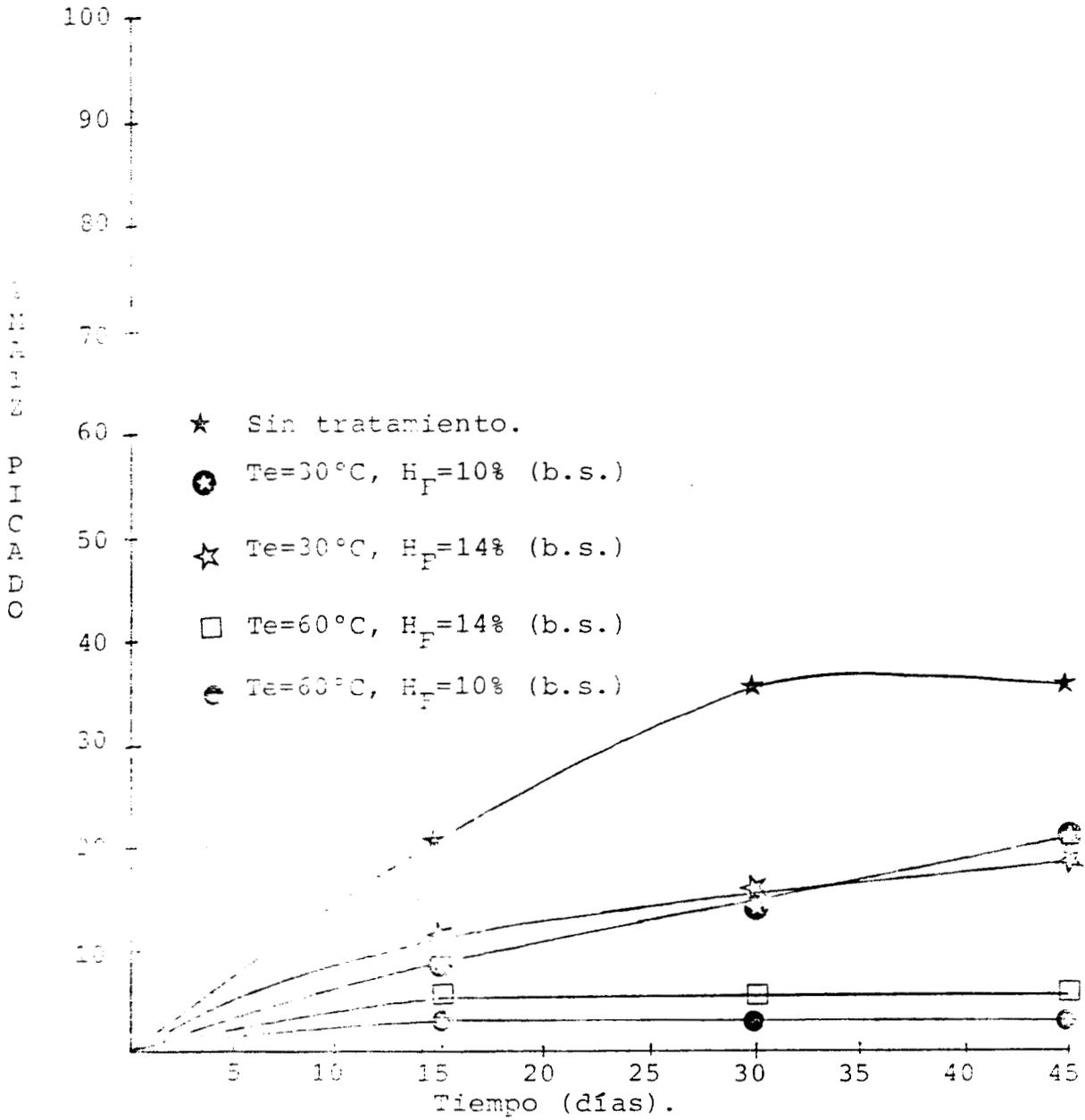


Fig. 24.- Porcentaje del grano picado con respecto al grano no picado. (Datos de ...)

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .

Tomando en cuenta toda la información presentada en los diferentes capítulos que comprende esta tesis, podemos concluir y recomendar lo siguiente:

En cuanto a la caracterización física del maíz, los métodos experimentales desarrollados fueron adecuados, lo cual quedó demostrado por la congruencia entre los resultados experimentales y los cálculos teóricos.

Se concluye que el aparato descrito en el capítulo 2 sirvió bastante bien para los fines que fué diseñado, encontrándose que las mejores condiciones de operación son las siguientes: U_f de 240 cm/seg, L/D de 1.0 y T_e de 60°C. Cabe señalar que el maíz se prepara mejor para el almacenamiento si se reduce su contenido de humedad hasta un 10% (b.s.)

Analizando las diferentes curvas de secado del maíz, se pueden deducir algunas conclusiones. Al comparar los resultados obtenidos cuando el aparato opera como un secador de lecho fijo y como uno de lecho fluidizado, a un mismo período de tiempo transcurrido, el contenido de humedad del maíz fluidizado siempre es menor, lo cual evidencia el mejor contacto sólido-gas alcanzado en los sistemas fluidizados. También, al comparar estas curvas a las diferentes condiciones de velocidad de fluidización, relación altura/diámetro del lecho y temperatura, se puede concluir que el parámetro que más influencia tiene, a las condiciones de operación analizadas, es la temperatura.

Por otro lado, puede observarse que muy pocos casos presentan un período constante de secado apreciable. Tomando en cuenta estas dos últimas observaciones, se puede pensar que el mecanismo que controla el secado del maíz es el de transferencia de masa intra-partí-

cula, lo cual concuerda con lo reportado por otros investigadores.

A pesar de que en pocos casos se observó el período de secado constante, se procedió a evaluar los coeficientes de transferencia de masa y calor, notándose que los valores de tales coeficientes fueron relativamente altos y se mantuvieron constantes en las diferentes condiciones de operación en que se observó tal comportamiento.

Dada la importancia del período decreciente de secado, se procedió a modelarlo matemáticamente, concluyéndose que el modelo cuyos resultados fueron más satisfactorios fué el que se basa en la ley de Fick de difusión molecular, considerando geometría esférica y ausencia de resistencias externas a la transferencia de masa. También pudo demostrarse que los seis primeros términos de la serie solución resultante son suficientes para modelar tal fenómeno.

Durante el proceso de desinfestación, dada la gran diferencia de densidades entre el maíz y los insectos, se notó la influencia de la velocidad superficial del aire, aunque no pudo cuantificarse. Es decir, el rango de velocidad de fluidización fijado en este estudio está muy por encima del necesario para fluidizar a los insectos. También la temperatura mostró ser un parámetro importante.

Asímismo, podemos considerar la utilización del lecho fluidizado como un buen método de acondicionamiento, además de que tiene la ventaja de que no se utiliza ningún tratamiento o productos químicos para evitar el desarrollo de los insectos y hongos.

El acondicionamiento del maíz utilizando este lecho fluidizado, nos permite preservar al grano hasta en un 73% de su valor energético(carbohidratos), y evitar también las pérdidas en un 92.6% de su contenido de proteína cruda (b.s.) y en un 92%(b.s.) las pérdidas en peso.

Si consideramos que sin este tratamiento se pierde aproximadamente un 30% del volumen aprovechable de granos, y si en 1982 este volumen fué de 15.3 millones de toneladas; podemos decir que 4.59 millones de toneladas de maíz podrían preservarse al utilizar este -

Por lo anterior se concluye que, el costo de importación, que en ese mismo año fué de 448 millones de dólares⁽²⁷⁾ se reduciría en un 62.7 %.

Dados los grandes volúmenes de sólidos que se manejan en el campo, creemos que un estudio más orientado a esta realidad sería el que se implementara con un equipo que opere en forma continua y que permita variar los tiempos de residencia del sólido. Un gran inconveniente de operar así un sistema de lecho fluidizado es el que, debido a que el sólido alcanza un patrón de flujo perfectamente mezclado, en una sola etapa, se obtendría un sólido con características no-homogéneas. Para minimizar tal tendencia se podría pensar en una operación continua multietapas. Asimismo, sería de gran utilidad un estudio económico del método.

Es conveniente aclarar, que las diferencias que puedan darse entre un estudio que, como éste, se realizó a nivel laboratorio, y lo que acontece en un almacenamiento real, puede dar lugar a resultados diferentes. En la práctica es muy difícil encontrar maíz infestado con una sola especie de insecto, como sucedió en nuestro caso. Por lo tanto sería conveniente utilizar otras especies de insectos en un estudio posterior, para analizar el efecto del acondicionamiento sobre las mismas.

A P E N D I C E A.

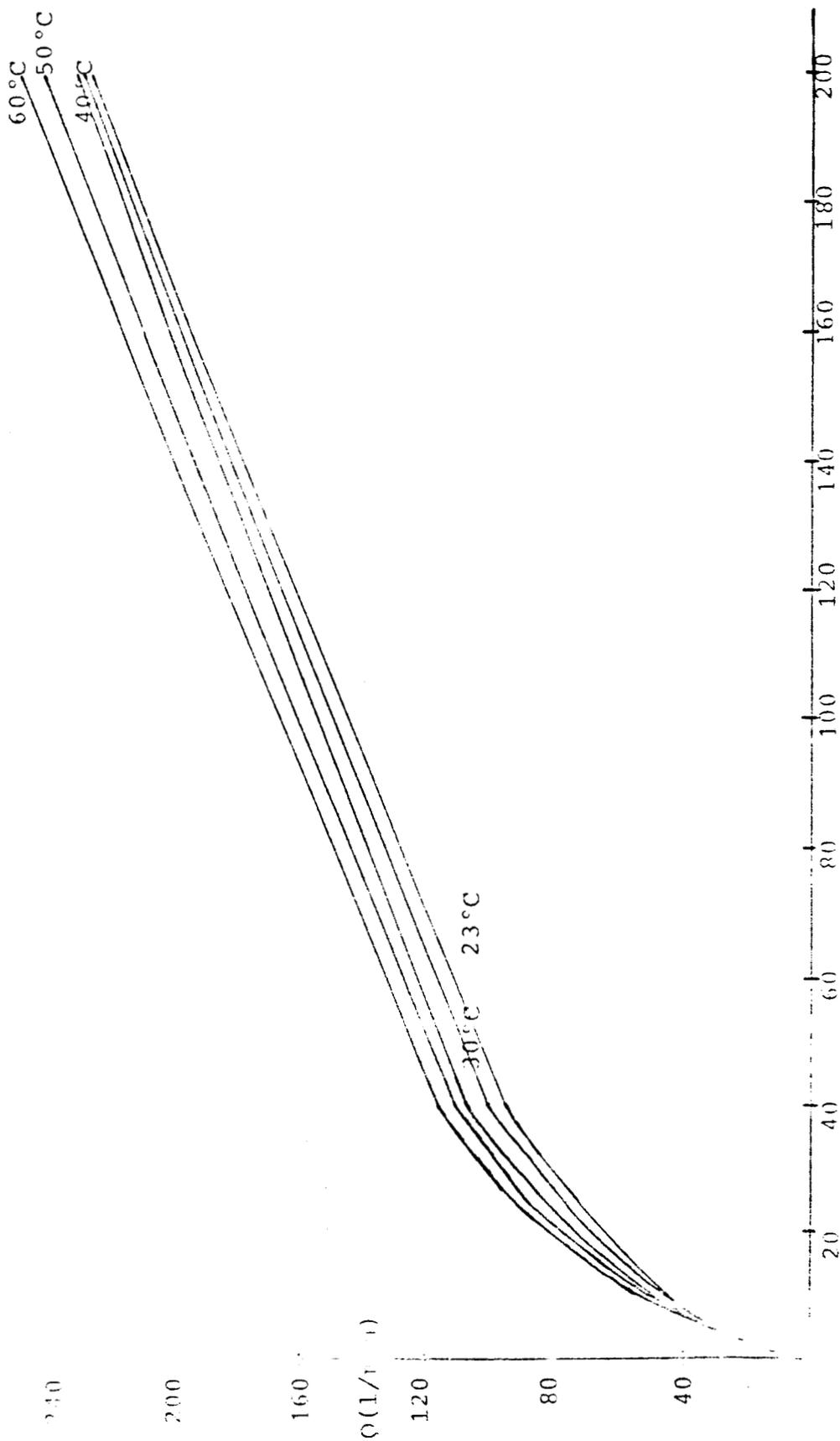


Fig. 1.- Curva de calibración para aire del medidor de flujo.

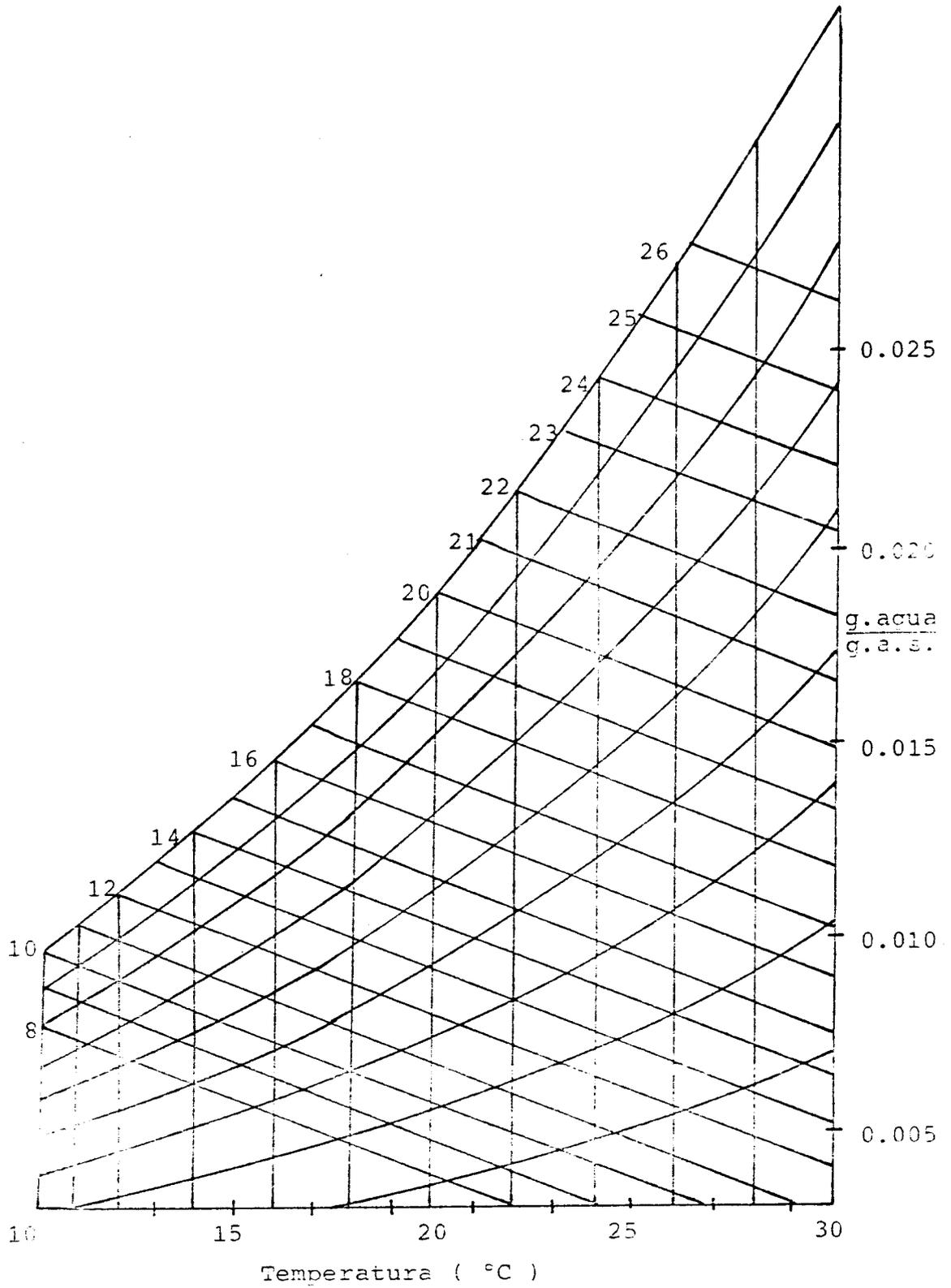


Fig.2.- Carta psicrométrica.P=546 mm Hg.

$\log \Delta P_L$ (g/cm ²)	$\log U_0$ (cm/seg)	L_f (cm)
0.0414	1.6530	
0.1139	1.7483	
0.2787	1.7922	
0.3802	1.8264	
0.4624	1.8633	
0.5315	1.9111	
0.5563	1.9460	
0.6434	1.9640	
0.6020	1.9930	
0.6232	2.0020	
0.5051	2.0290	
0.6434	2.0390	
0.5185	2.0810	5.5
0.5440	2.1090	6.0
0.5682	2.1380	
0.5563	2.1460	6.5
0.4313	2.1640	
0.5682	2.1850	
0.5563	2.1940	
0.4313	2.2050	
0.5682	2.2150	
0.6128	2.2340	
0.5798	2.1000	
0.5798	2.1200	
0.5798	2.1500	
0.5798	2.2000	
0.5798	2.2400	
0.5798	2.3000	
0.5798	2.3500	
0.5440	2.0810	
0.5185	2.0500	
0.4624	2.0400	
0.3802	1.9500	
0.3802	1.9100	
0.2787	1.8000	

Tabla 1.- Datos de log de la velocidad superficial del aire vs. log de la caída de presión en el lecho, utilizados para la construcción de la Fig.5. $L/D = 1.0$, $T_e = 23^\circ\text{C}$, $P_1 = 45 \text{ lb/plg}^2$.

A P E N D I C E B .

1.- ENTOMOLOGIA .

Además de discrepar en tamaño y forma, las especies de insectos difieren en cuanto a fuentes preferidas de alimento, medio ideal para el crecimiento y pauta de su desarrollo.

Por lo tanto, cuando se intente disminuir pérdidas de alimentos almacenados, debidas a insectos, es importante no solamente la identificación de la especie en cuestión, sino también el conocimiento de los aspectos de su biología que puedan determinar las medidas que habrán de emplearse para combatirla.

CARACTERISTICAS:

Orden: Coleóptero.

Familia: Curculiónidos.

Especie: Sitophilus zeamais.

Nombre vulgar: Gorgojo del maíz.

IDENTIFICACION:

Adultos de 2.5 a 4.5 mm de longitud. Se distinguen de todos los demás escarabajos porque tienen un pico o trompa bien definido y las antenas acodadas y en forma de rabe.

Alas posteriores presentes, en el protórax hoyuelos redondos y muy espesos; los élitros presentan generalmente 4 manchas rojizas.

Atacan principalmente al maíz, trigo, arroz y arroz bruto (limitadamente).

TIPO DE LOS DAÑOS:

El daño principal es el causado por el gorgojo en el almacenamiento de los

granos.

HABITOS Y CICLO DE VIDA:

Por lo general, los adultos rehúyen la luz fuerte y, si se les inquieta, se muestran muy activos. Pueden volar, y, por ende, pueden atacar los cereales en el campo antes de la recolección, la actividad de vuelo es muy pronunciada. En condiciones óptimas, la hembra pone de 100 a 150 huevos durante un período de muchas semanas (la actividad ponedora de huevos alcanza su punto máximo aproximadamente tres semanas después de haber salido de la fase de pupa).

Cada uno de los huevos queda puesto en un diminuto agujero que la hembra hace en el grano por masticación, y luego queda sellado - dentro del agujero por medio de una secreción. La larva carente de patas, permanece dentro del grano, donde se alimenta y finalmente - pasa a la fase de pupa. Cuando el desarrollo está completo, el individuo se abre paso para salir del grano, masticando éste y deja tras de sí un agujero de salida.

Tanto las larvas como los adultos se alimentan y estos últimos pueden vivir hasta cinco meses.

CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD PARA SU DESARROLLO:

% H.R. : Máxima = 100 %, Mínima = 45 %

Temperatura: Máxima = 34 ° C, Mínima = 17 ° C

% Óptimo de H.R. = 70 %

Temperatura óptima = 28 ° C .

2.- METODO MACRO-KJELDAHL PARA DETERMINACION DE PROTEINA CRUDA.

Introducción.

Las proteínas son los componentes esenciales de los alimentos y se utilizan en la formación y regeneración de tejidos así como en la regulación de procesos metabólicos.

La diferencia entre proteínas animales y vegetales es que las de origen animal contienen todos los aminoácidos esenciales, en cambio la proteína de origen vegetal no contiene a todos éstos, o bien, se encuentran en cantidades muy bajas.

El método Kjeldahl consiste en tres etapas que son: digestión, destilación y titulación.

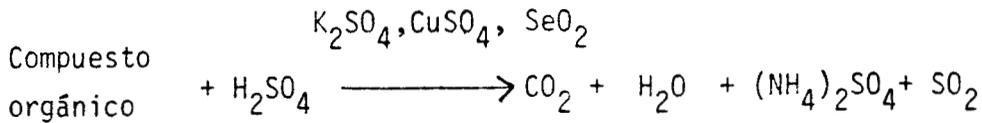
Con respecto a los reactivos utilizados, cabe mencionar que el selenio acorta el tiempo de clarificación de la muestra pero frecuentemente ha dado un falso presentimiento de que la digestión está completa, cuando se han confundido tiempos de clarificación y terminación.

Las sales como sulfato de sodio o potasio son comunmente añadidas a la mezcla digestora para incrementar el punto de ebullición de la mezcla y consecuentemente acortar el tiempo de digestión. Sin embargo, la proporción de sal:ácido no debe ser muy alta porque habría pérdida de amoníaco por descomposición del sulfato de amonio.

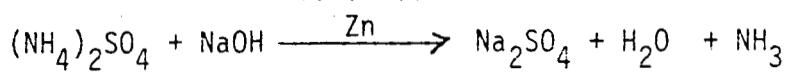
Fundamento.

El fundamento de la determinación puede resumirse mediante las siguientes reacciones:

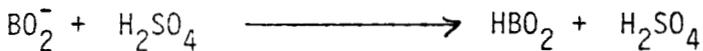
Digestión.



Destilación.



Titulación.



El BO_2^- es equivalente al amoníaco absorbido.

DETERMINACION DE NITROGENO.

MATERIAL:

Aparato de digestión y destilación "LAF-COX-CO"

Matraz Kjeldahl de 800 ml

Matraz Erlenmeyer de 500 ml

Soporte y pinza universal

Probeta de 100 ml

Bureta de 50 ml

Espátula

Papel glacina

Balanza analítica

REACTIVOS:

Acido sulfúrico concentrado

Hidróxido de sodio al 50 %

Acido sulfúrico 0,1 N

Sulfato de cobre 8 g.

Sulfato de potasio 80 g.

Mezcla digestora

—————> Dióxido de selenio 2 g.

PROCEDIMIENTO:

A.- Digestión.

- 1.- Pesar de 0.5 a 1 g. de muestra sólida y colocar en un matraz - Kjeldahl con todo y papel glacine. (En caso de tratarse de un - líquido, se toma 1 ml con pipeta volumétrica).
- 2.- Pesar 8.5 g. de mezcla digestora y colocar en el matraz Kjeldahl.
Nota: La mezcla digestora se prepara moliendo sus componentes - en un mortero, de acuerdo al orden siguiente: primero el sulfato de cobre, después el sulfato de potasio y por último el dióxido de selenio.
- 3.- Añadir 25 ml de H_2SO_4 concentrado y poner 4 perlas de vidrio - para controlar la ebullición.
- 4.- Colocar el matraz en el aparato de digestión y dejar en ebullición durante una hora aproximadamente, hasta que la muestra esté completamente transparente (de un color azul-verdoso) y dejen- de salir vapores blancos.
- 5.- Terminado el tiempo, se apaga el aparato dejando el matraz - Kjeldahl hasta que dejen de salir vapores (30 min. aproxima-

B.- Destilación.

- 6.- Una vez frío el matraz, adicionar lentamente, 300 ml de agua - destilada y agitar suavemente.
- 7.- Adicionar 90 ml de sosa al 50 % con mucho cuidado, evitando que reaccionen con el ácido (se inclina el matraz para que caiga en las paredes y llegue lentamente al fondo). No se agite.
- 8.- Agregar un poco de granalla de zinc (Aproximadamente la punta- de una espátula (0.1 g.).
- 9.- Colocar el matraz Erlenmeyer con ácido bórico al 2 % e indica- dor, a la salida del refrigerante del destilador, asegurándose - que el tubo de salida quede sumergido en el ácido bórico.
- 10.-Colocar la trampa del destilador al matraz Kjeldahl.
- 11.-Agitar ligeramente el matraz Kjeldahl y someter a ebullición has- ta destilar aproximadamente 200 ml.
- 12.-Una vez destilados los 200 ml, apagar el aparato y titular el - destilado con H_2SO_4 0.1 N .

CALCULOS:

$$\% N = \frac{(\text{ml de ácido gastados}) (N \text{ ácido}) (0.014) (100)}{\text{g. de muestra seca}}$$

dónde:

N es el porcentaje de nitrógeno,

N del ácido es la normalidad del ácido sulfúrico,

0.014 es el miliequivalente del nitrógeno.

Posteriormente se multiplica el % de nitrógeno por el factor de conversión correspondiente:

Huevo	6.25	Trigo	5.70
Carne	6.25	Frijol	6.25
Leche	6.38	Soya	5.71
** Maíz	6.25	Nuez	5.30

Tabla de factores de conversión para proteína cruda para distintos alimentos.

3.- DETERMINACION DE CARBOHIDRATOS TOTALES DISPONIBLES POR ANTRONA.

Aplicación.

El método es aplicable a todo tipo de alimentos.

Fundamento.

El material se digiere con ácido perclórico. Los almidones hidrolizados junto con los azúcares solubles se determinan colorimétricamente por el método de la antrona y se expresan como glucosa.

Reactivos.

Acido perclórico al 52 %. Adicionar 270 ml de ácido perclórico a 100 ml de agua. Enfriar antes de usar.

Acido sulfúrico. Cuidadosamente agregar 760 ml de ácido sulfúrico a 330 ml de agua. Enfriar antes de usar.

Reactivo de antrona. Hacer suficiente al 0.1 % en ácido sulfúrico - para lo que se requiera durante el día.

Solución std. de glucosa. Disolver 100 mg de glucosa en 100 ml de agua destilada.

Solución std. diluída. Diluir 10 ml de la solución std. a 100 ml con agua (1 ml = 0.1 mg de glucosa).

Aparatos.

Papel filtro Whatman No.542 o Schleicher y Schül No. 150.

Espectrofotómetro. Para determinación manual. Adecuado para medir a 630 nm.

Procedimiento.

A.- Extracción.

- 1.- Pesar aproximadamente 1 g. de muestra seca o 2.5 g. de muestra húmeda.
- 2.- Transferir a un tubo graduado de 100 ml.
- 3.- Agregar 100 ml de agua y mezclar con un agitador de vidrio para dispersar la muestra.
- 4.- Adicionar 13 ml de ácido perclórico al 52 % al tubo de ensaye.
- 5.- Mezclar frecuentemente con el agitador de vidrio por un tiempo mínimo de 20 minutos.
- 6.- Lavar el agitador y diluir el contenido a ~~100 ml.~~ \rightarrow 250 ml.
- 7.- Mezclar y filtrar en un matraz aforado de 250 ml. \leftarrow
- 8.- Lavar y transferir los lavados al matraz aforado.

B.- Determinación.

- 1.- Diluir 10 ml del extracto de la muestra a 100 ml con agua. \rightarrow
- 2.- Pipetear 1 ml del filtrado diluido en un tubo de ensaye.
- 3.- Pipetear por duplicado 1 ml de solución std. de glucosa.
- 4.- Pipetear por duplicado 1 ml de agua como testigo.
- 5.- Pipetear rápidamente a todos los tubos 5 ml de antrona fría.
- 6.- Tapar los tubos y mezclar el contenido fuertemente.
- 7.- Colocar en un baño de agua hirviendo por exactamente 12 min.
- 8.- Enfriar a la temperatura ambiente.
- 9.- Transferir la solución a una celda de 1 cm.
- 10.- Leer la absorbancia de la muestra y la solución std. a 630 nm.

Cálculos.

Con la curva de calibración se corrigen los -

resultados (Fig. B.1) obteniéndose un contenido de carbohidratos en mg/ml.

En este caso, la cantidad de muestra fué de 0.3542 mg/ml
Por lo tanto:

$$\% \text{ C.T.D.} = \frac{(0.90)(\bar{a})}{0.3542}$$

dónde:

\bar{a} = Lectura corregida para el contenido de carbohidratos por ml de acuerdo a la curva de calibración.

0.90 = Factor de corrección que se utilizó por haber usado dextrosa en vez de glucosa.

0.3542 = Cantidad de muestra utilizada.

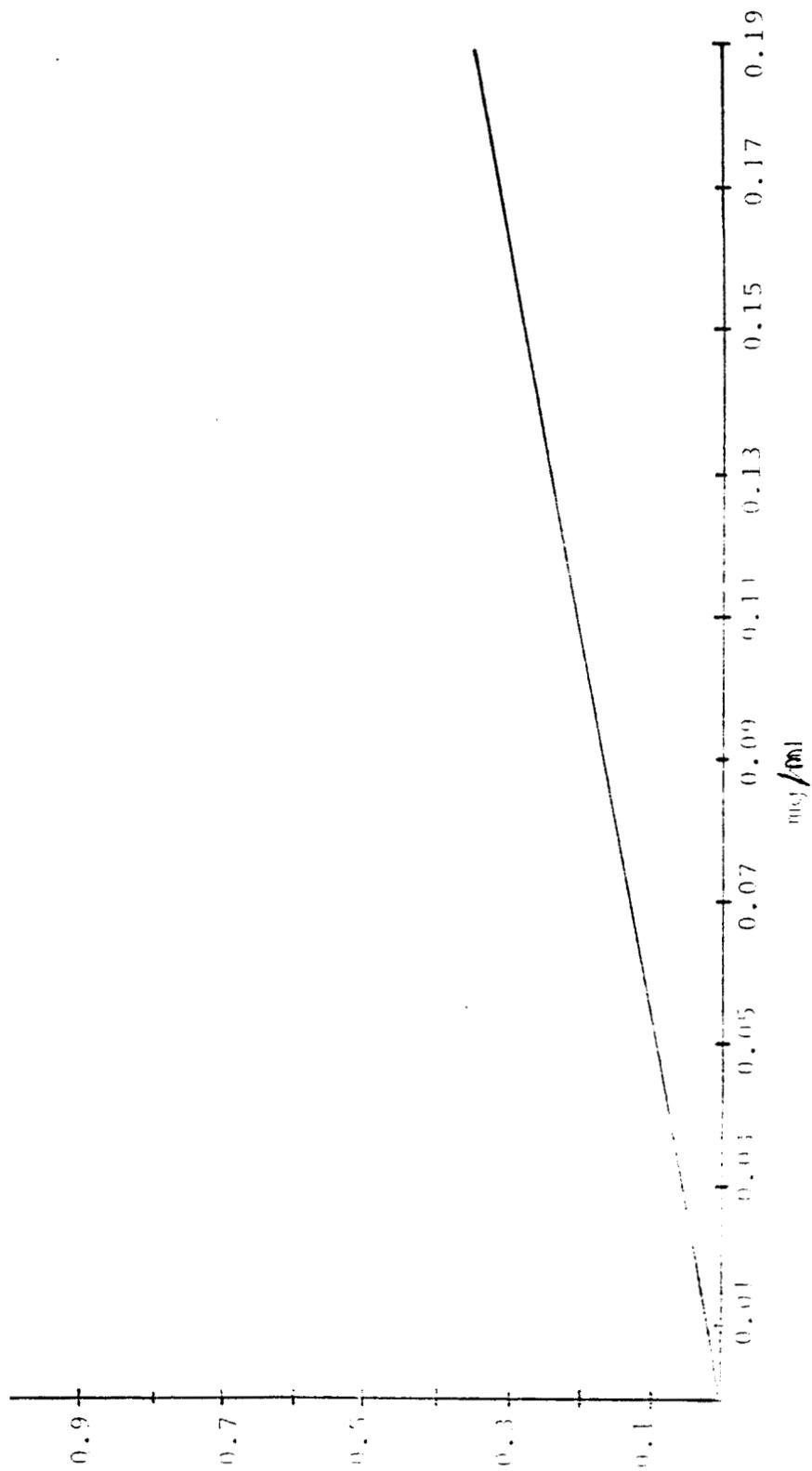


Fig. B.1. - Curva de calibración para determinación de carbohidratos totales -
disacáridos.

A P E N D I C E C.

He $\frac{\text{g agua}}{100 \text{ g de s.s.}}$

Aw	30°C	40°C	50°C	60°C
0.20	7.4951	6.5888	5.5200	5.0654
0.30	9.4050	7.4827	7.1979	6.4910
0.35	10.3173	8.3407	8.0200	7.1796
0.40	11.2244	9.1818	8.8493	7.8686
0.50	12.1400	11.7393	10.5760	9.2863
0.60	15.0740	13.5999	12.4822	10.8274
0.70	17.3645	15.7453	14.7232	12.6111
0.80	20.2569	18.4587	17.6176	14.8740

Tabla 1.- Datos primarios para la construcción de la Fig.6. Aw es la actividad acuosa.

θ (min)	T_e (°C)	$t_{b.s.}$ (°C)	$t_{b.h.}$ (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	28.0	10.0	36.0
30	30.0	27.0	13.0	34.4
45	30.0	27.0	14.0	24.6
60	30.0	27.0	13.0	27.8
75	30.0	27.0	14.0	24.4
100	30.0	27.0	14.0	22.0
120	30.0	28.0	14.0	22.3
160	30.0	28.0	14.0	21.8
180	30.0	28.0	14.0	20.0
210	30.0	28.0	14.0	19.0
240	30.0	28.0	14.0	18.0
300	30.0	28.0	14.0	17.0

Tabla 2.- Datos primarios para las siguientes condiciones:
L/D=0.5, $U_f=90$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	$t_{b.s.}$ (°C)	$t_{b.h.}$ (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	26.0	8.0	36.0
20	30.0	30.0	15.0	25.0
40	30.0	30.0	17.0	24.3
60	30.0	30.0	16.0	21.0
80	30.0	30.0	15.0	20.6
100	30.0	30.0	15.0	20.4
120	30.0	30.0	14.0	19.9
140	30.0	30.0	14.0	19.8
160	30.0	30.0	14.0	18.5
180	30.0	30.0	14.0	18.0
210	30.0	30.0	14.0	15.7
240	30.0	30.0	14.0	14.8
300	30.0	30.0	14.0	13.8

Tabla 3.- Datos primarios para las siguientes condiciones:
L/D=0.5, $U_f=240$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	32.0	32.0	13.0	36.0
20	30.0	30.0	14.0	28.5
40	30.0	30.0	14.0	29.5
60	30.0	30.0	14.0	22.6
80	30.0	30.0	14.5	21.6
100	30.0	30.0	14.0	21.6
160	30.0	30.0	13.0	23.0
180	30.0	30.0	14.0	18.8
210	30.0	30.0	13.0	18.4
240	30.0	30.0	13.0	16.5
300	30.0	30.0	13.0	15.5

Tabla 4.- Datos primarios para las siguientes condiciones:
 $L/D=0.5$, $U_f=300$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	29.0	12.0	36.0
20	30.0	29.0	16.0	23.0
40	30.0	29.0	17.0	27.0
80	30.0	29.0	16.5	22.0
100	30.0	29.0	17.0	18.0
120	30.0	29.0	17.0	20.0
180	30.0	29.0	14.0	16.8
220	30.0	29.9	14.0	18.0
300	30.0	29.0	14.0	15.0

Tabla 5.- Datos primarios para las siguientes condiciones:
 $L/D=0.5$, $U_f=360$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	28.0	10.0	36.0
20	30.0	28.0	14.0	32.0
40	30.0	28.0	15.5	30.0
60	30.0	28.0	14.0	28.5
80	30.0	28.0	15.0	28.0
110	30.0	29.0	14.5	22.2
180	30.0	29.0	13.0	20.4
300	30.0	29.0	12.0	20.3

Tabla 6.- Datos primarios para las siguientes condiciones:
L/D=1.0, $U_f=90$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	t.bh. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	31.0	31.0	14.0	36.0
20	30.0	30.0	15.0	27.8
55	30.0	30.0	16.5	24.4
80	30.0	30.0	17.0	22.3
100	30.0	30.0	16.5	20.4
120	30.0	30.0	16.0	19.0
140	30.0	30.0	16.0	18.1
160	30.0	30.0	16.0	17.8
180	30.0	30.0	16.0	17.4
210	30.0	30.0	15.0	17.1
240	30.0	30.0	15.0	15.5
270	30.0	30.0	15.0	14.8
300	30.0	30.0	15.0	14.25

Tabla 7.- Datos primarios para las siguientes condiciones:
L/D=1.0, $U_f=240$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	$t_{b.s.}$ (°C)	$t_{b.h.}$ (°C)	\bar{H} $\frac{g. \text{ agua}}{g.m.s.} \times 100$
0	30.0	30.0	10.0	36.0
20	30.0	30.0	14.5	36.0
40	30.0	30.0	14.0	28.8
60	30.0	30.0	13.5	26.8
80	30.0	30.0	13.0	25.8
100	30.0	30.0	13.0	24.2
120	30.0	30.0	14.0	23.8
140	30.0	30.0	13.0	23.0
160	30.0	30.0	14.0	22.4
180	30.0	30.0	14.0	21.4
210	30.0	30.0	14.0	19.7
240	31.0	30.0	14.0	19.4
270	31.0	30.0	14.0	17.0
300	31.0	30.0	14.0	16.0

Tabla 8.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D=1.0$, $U_f=300$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	$t_{b.s.}$ (°C)	$t_{b.h.}$ (°C)	\bar{H} $\frac{g. \text{ agua}}{g.m.s.} \times 100$
0	30.0	28.0	12.0	36.0
20	30.0	28.0	13.0	31.0
40	30.0	28.0	16.0	30.2
60	30.0	29.0	17.0	29.0
80	30.0	29.0	16.0	24.2
100	30.0	29.0	15.0	21.4
120	30.0	29.0	15.0	20.3
183	30.0	29.0	15.0	17.3
219	30.0	29.0	15.0	16.1
300	30.0	29.0	15.0	16.0

Tabla 9.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D=1.0$, $U_f=360$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	27.0	9.5	36.0
30	30.0	28.0	12.0	28.7
45	30.0	28.0	12.5	35.3
60	30.0	28.0	13.0	30.6
90	30.0	28.0	14.5	22.1
105	30.0	29.0	14.0	20.8
120	30.0	29.0	13.5	21.6
140	30.0	29.0	13.5	19.2
150	30.0	29.0	13.5	21.4
210	30.0	29.0	13.5	18.0
300	30.0	29.0	13.5	17.0

Tabla 10.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D=1.5$, $U_f=90$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	26.0	9.0	36.0
20	30.0	29.0	15.0	35.2
40	30.0	30.0	16.0	32.5
70	30.0	30.0	16.0	28.6
100	30.0	30.0	15.0	24.2
120	30.0	30.0	15.0	23.7
140	30.0	30.0	16.0	20.7
160	30.0	30.0	16.5	19.7
180	30.0	30.0	16.0	19.2
210	30.0	30.0	16.0	17.8
240	30.0	30.0	15.0	16.1
270	30.0	30.0	14.0	14.0
300	30.0	30.0	14.0	13.0

Tabla 11.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D=1.5$, $U_f=240$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	27.0	10.0	36.0
20	30.0	30.0	14.0	34.0
40	31.0	31.0	16.0	27.7
85	30.0	30.0	15.0	26.5
100	30.0	30.0	15.0	28.6
120	30.0	30.0	14.5	20.8
140	30.0	30.0	14.5	24.0
160	31.0	30.5	15.0	21.3
180	30.5	30.0	14.0	20.6
210	31.0	30.0	14.5	19.5
240	30.0	30.0	13.5	19.2
270	30.0	30.0	13.0	17.4
300	30.0	30.0	13.0	16.3

Tabla 12.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D= 1.5$, $U_f=300$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	32.0	32.0	13.0	36.0
20	30.0	30.0	15.0	27.02
40	30.0	30.0	15.0	24.45
100	30.0	30.0	15.0	25.55
140	31.0	31.0	15.0	19.14
160	30.0	30.0	15.0	18.39
180	31.0	31.0	15.0	17.75
210	30.0	30.0	15.0	18.3
240	30.0	30.0	14.0	15.1
300	30.0	30.0	14.0	14.1

Tabla 13.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D=1.5$, $U_f=360$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	30.0	10.0	36.0
20	30.0	24.0	13.0	32.7
50	30.0	26.0	13.0	27.5
80	30.0	26.0	14.0	23.0
100	30.0	27.0	14.0	24.5
120	30.0	27.0	14.0	24.9
150	30.0	27.0	14.0	22.57
210	30.0	27.0	13.0	19.97
240	30.0	27.0	13.0	18.32
300	30.0	27.0	13.0	18.1

Tabla 14.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D=2.0$, $U_f=90\text{cm/seg}$, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	30.0	9.0	36.0
30	30.0	30.0	13.0	30.1
60	30.0	30.0	14.0	23.8
80	30.0	30.0	14.0	23.5
100	30.0	30.0	15.0	23.2
120	30.0	30.0	14.0	21.7
140	30.0	30.0	14.0	20.1
160	30.0	30.0	14.0	18.4
180	30.0	30.0	14.0	17.7
210	30.0	30.0	14.0	17.5
240	30.0	30.0	14.0	17.0
270	30.0	30.0	14.0	16.5
300	30.0	30.0	14.0	15.6

Tabla 15.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D=2.0$, $U_f=240\text{ cm/seg}$, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	30.0	10.0	36.0
20	30.0	30.0	12.0	32.4
40	30.0	30.0	12.0	24.05
60	30.0	30.0	12.5	23.23
80	30.0	30.0	13.0	23.04
100	30.0	30.0	14.0	23.63
140	30.0	30.0	13.5	20.2
160	30.0	30.0	14.0	19.54
195	30.5	30.0	14.0	19.32
270	30.0	30.0	14.0	17.09
300	31.0	30.0	14.0	16.1

Tabla 16.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D=2.0$, $U_f=300$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	T_e (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g.m.s.}} \times 100$
0	30.0	30.0	11.0	36.0
20	30.0	28.0	11.0	32.41
50	30.0	30.0	12.5	34.1
80	30.0	30.0	15.0	23.32
100	30.0	30.0	14.0	21.90
120	30.0	30.0	14.0	20.65
140	30.0	30.0	14.0	20.02
160	30.0	30.0	14.5	20.14
180	30.0	30.0	14.0	20.0
210	30.0	30.0	14.0	18.0
240	30.0	30.0	14.0	18.3
270	30.0	30.0	14.0	17.90
300	30.0	30.0	14.0	16.07

Tabla 17.- Datos primarios para las siguientes condiciones:

$L/D=2.0$, $U_f=360$ cm/seg, $T_e=30^\circ\text{C}$.

θ (min)	Te (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g. m. s.}} \times 100$
0	40.0	35.0	15.0	36.0
10	40.0	35.0	16.0	26.34
30	40.0	35.0	18.0	27.0
50	40.0	35.0	19.0	24.3
80	40.0	35.0	19.0	22.8
100	40.0	35.0	19.0	20.4
120	40.0	35.0	19.0	18.8
140	40.0	35.0	19.0	19.2
160	40.0	35.0	19.0	17.76
180	40.0	35.0	18.0	17.6
200	40.0	35.0	18.0	15.5
240	40.0	35.0	17.5	14.5
270	40.0	35.0	17.5	13.5
300	40.0	35.0	17.5	12.8

Tabla 18.- Datos primarios para las siguientes condiciones:
L/D = 1.0, Uf=240 cm/seg, Te= 40 °C.

θ (min)	Te (°C)	tb.s. (°C)	tb.h. (°C)	\bar{H} $\frac{\text{g. agua}}{\text{g. m. s.}} \times 100$
0	49.0	34.0	16.0	36.0
10	49.0	34.0	17.0	25.35
20	50.0	38.0	19.0	23.6
30	50.0	40.0	21.0	28.17
40	50.0	40.0	20.0	23.56
60	50.0	40.0	20.0	18.67
80	50.0	40.0	20.0	16.82
100	50.0	40.0	20.0	15.98
130	50.0	40.0	20.0	14.95
160	50.0	40.0	20.0	14.5
180	50.0	40.0	20.0	12.7
200	50.0	40.0	20.0	12.7
250	50.0	40.0	20.0	10.0
300	50.0	40.0	20.0	10.0

Tabla 19.- Datos primarios para las siguientes condiciones:
L/D=1.0, Uf=240 cm/seg, Te=50 °C.

θ (min)	T_e (°C)	$t_{b.s.}$ (°C)	$t_{b.h.}$ (°C)	\bar{H} $\frac{g. \text{agua}}{g. m. s.} \times 100$
0	30.0	30.0	9.0	36.0
20	59.0	52.0	22.0	30.0
30	59.5	54.0	23.0	25.0
40	59.5	54.0	23.0	18.2
50	59.5	54.0	23.0	17.0
60	59.5	54.0	23.0	15.6
70	59.5	54.0	23.0	15.4
80	59.5	54.0	22.5	14.0
90	59.5	54.0	23.0	13.3
100	59.5	54.0	23.0	12.0
120	59.5	54.0	24.0	11.2
150	60.0	55.0	24.0	10.0
180	60.0	55.0	23.0	9.3
210	60.0	55.0	23.0	8.7
240	60.0	55.0	23.0	7.8
270	60.0	55.0	23.0	7.6
300	60.0	55.0	23.0	7.5

Tabla 20.- Datos primarios para las siguientes condiciones:
 $L/D=1.0$, $U_f=240$ cm/seg, $T_e= 60$ °C.

\bar{H} - He

Ho - He

Tiempo (min)	velocidad de fluidización. (cm/seg)			
	90	240	300	360
0	0.9067	0.9067	0.9067	0.9067
20	-	0.6902	0.7354	0.6924
30	0.7136	-	-	-
40	-	0.5797	0.6391	0.5826
45	0.6566	-	-	-
60	0.6103	0.5019	0.5697	-
75	0.5710	-	-	-
80	-	0.4411	0.5146	0.4446
100	0.5160	0.3911	0.4686	0.3948
120	0.4786	0.3488	-	0.3526
140	-	0.3123	-	-
160	0.4161	0.2805	0.3635	-
180	0.3894	0.2524	0.3358	0.2563
210	0.3537	0.2161	0.2992	-
240	0.3222	0.1854	0.2674	0.2090
300	0.2690	0.1369	0.2146	0.1403

Tabla 21.- Datos calculados de humedad reducida utilizados para la construcción de la Fig.16.L/D=0.5, Te=30°C. He= 10.3% (b.s.)

\bar{H} - He
Ho - He

Tiempo (min)	velocidad superficial (cm/seg)			
	90	240	300	360
0	0.9067	0.9067	0.9067	0.9067
20	0.7936	0.6988	0.7765	0.7415
40	0.7191	-	0.6949	0.6472
55	-	0.5319	-	-
60	0.6630	-	0.6345	0.5790
80	0.6174	0.4548	0.5858	0.5248
100	-	0.4055	0.5447	0.4794
110	0.5612	-	-	-
120	-	0.3636	0.5089	0.4403
140	-	0.3273	0.4771	-
160	-	0.2956	0.4485	-
180	0.4626	0.2675	0.4226	0.3440
210	-	0.2309	0.3877	-
220	-	-	-	0.3014
240	-	0.1998	0.3568	-
270	-	0.1731	0.3291	-
300	0.3474	0.1502	0.3040	0.2266

Tabla 22.- Datos calculados de humedad reducida utilizados para la construcción de la Fig.17. L/D=1.0, Te= 30°C. He=10.3%(b.s.)

$\bar{H} - He$
 $H_o - He$

Tiempo (min)	velocidad de fluidización (cm/seg)			
	90	240	300	360
0	0.9067	0.9067	0.9067	0.9067
20	-	0.7506	0.7757	0.7168
30	0.7135	-	-	-
40	-	0.6594	0.6939	0.6144
45	0.6564	-	-	-
60	0.6101	-	-	-
70	-	0.5655	-	-
90	0.5365	-	0.5736	-
100	0.5060	0.4959	0.5433	0.4359
120	0.4784	0.4576	0.5074	-
140	0.4454	0.4238	0.4755	0.3594
150	0.4303	-	-	-
160	-	0.3937	0.4469	0.3280
180	-	0.3665	0.4210	0.3000
210	0.3535	0.3303	0.3861	0.2632
240	-	0.2986	0.3551	0.2316
270	-	0.2705	0.3273	-
300	0.2688	0.2454	0.3023	0.1801

Tabla 23.- Datos calculados de humedad reducida utilizados para la construcción de la Fig.18. L/D=1.5, Te= 30°C, He=10.3 % (b.s.)

$$\frac{\bar{H}}{H_0} - \text{He}$$

Tiempo (min)	velocidad de fluidización (cm/seg)			
	90	240	300	360
0	0.9067	0.9067	0.9067	0.9067
20	0.7754	-	0.7372	0.7548
40	-	-	0.6415	-
60	0.6666	0.5654	9.5725	-
80	0.5839	0.4857	0.5176	0.5475
100	0.5426	0.4635	0.4717	0.5036
120	0.5067	0.4237	-	0.4657
140	-	0.3889	0.3977	0.4322
160	0.4601	0.3580	0.3670	0.4023
195	-	-	0.3204	-
210	0.3853	0.2936	-	0.3393
240	0.3543	0.2617	-	0.3076
270	-	0.2338	0.2429	0.2795
300	0.3015	0.2091	0.2181	0.2544

Tabla 24.- Datos calculados de humedad reducida utilizados para la construcción de la Fig.19. L/D=2.0, Te= 30°C, He=10.3% (b.s.).

\bar{H} - He

Ho - He

Tiempo (Min)	Temperatura de alimentación (°C)		
	40	50	60
0	0.9067	0.9067	0.9067
10	0.7835	0.7307	-
20	-	0.6327	0.5656
30	0.6461	0.5624	0.4859
40	-	0.5066	0.4239
50	0.5584	-	0.3732
60	-	0.4201	0.3305
80	0.4642	0.3542	0.2619
90	-	-	0.2340
100	0.4154	0.3014	0.2093
120	0.3738	-	0.1680
130	-	0.2389	-
150	-	-	0.1213
160	0.3060	0.1906	-
180	0.2779	0.1643	0.0877
200	0.2528	0.1417	-
210	-	-	0.0635
240	0.2099	-	0.0459
250	-	0.0332	-
270	0.1830	-	0.0333
300	0.1596	0.0681	0.02410

He=9.18%(b.s.) He=8.02%(b.s.) He=7.18%(b.s.)

Tabla 25.- Datos calculados de humedad reducida utilizados para la construcción de la Fig.20. L/D= 1.0, Uf=240 cm/seg.

% P R O T E I N A C R U D A .

Tiempo (días)	Control	Tratamiento 30°C, 10% (b.s.)	Tratamiento 30°C, 14% (b.s.)	Tratamiento 60°C, 10% (b.s.)	Tratamiento 60°C, 14% (b.s.)	Tratamiento 3er. día, 60°C, 10% (b.s.)
0	10.83	10.83	10.83	10.83	10.83	10.83
7	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	-
15	9.79	10.70	10.70	10.70	10.70	-
30	9.05	10.50	10.40	10.65	10.65	-
45	8.40	10.44	10.25	10.65	10.65	10.82

% CARBOHIDRATOS TOTALES DISPONIBLES.

0	86.39	86.39	86.39	86.39	86.39	86.39
7	78.70	78.70	78.70	78.70	78.70	-
15	40.15	71.91	68.35	78.70	75.21	-
30	36.34	68.35	64.79	75.21	71.91	-
45	32.78	64.79	61.20	71.91	68.35	82.58

Tabla 26.- Datos de porcentaje de protefna cruda y carbohidratos totales disponibles con respecto al tiempo de almacenamiento para los diferentes tratamientos. Condiciones de almácn de 61±3 % H.R., 27±1°C. Valores utilizados para la construcción de las Figs. 22 y 23.

A P E N D I C E D.

1.- SECUENCIA DE CALCULO PARA LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA.

De las ecuaciones 1.5 y 1.6 para el cálculo del área de transferencia de calor y masa:

$$W = 55 \text{ g}$$

$$\rho = 1.21 \text{ g/cm}^3$$

$$d_{pe} = 0.61 \text{ cm}$$

$$L_f = 5.625 \text{ cm}$$

$$a = 80.8080 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

$$A_t = 15.904 \text{ cm}^2$$

$$A = 5.081 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$$

$$- dH/d\theta = 0.90 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$$

$$L = 587.204 \text{ cal/g}$$

$$(t \text{ b.s.} - t \text{ b.h.}) = 13.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\omega = 0.0075 \text{ g agua/g a.s. (de la carta psicrométrica)}$$

X

Sustituyendo todos estos valores en los balances de masa y energía, se obtiene:

$$m = 10.017 \text{ g/min}$$

$$n = 9.44 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2\text{min. }^\circ\text{C}$$

Parámetros		$-(dH/d\theta) \text{ min}^{-1}$
L/D	Uf (cm/seg)	
1.0	90	0.00100
1.0	240	0.00090
1.0	300	0.00091
1.5	90	0.00110
1.5	240	0.00120

Tabla 1.- Datos de velocidad de secado obtenidos a partir de las curvas de secado correspondientes.

2.- SECUENCIA DE CALCULO DE D_m Y ANALISIS DE LOS DISTINTOS CASOS PARA EL MODELO DE DIFUSION MOLECULAR.

- I.- Geometría esférica, resistencias externas despreciables y el primer término de la ecn. 1.22.
- II.- Geometría esférica, resistencias externas considerables y el primer término de la ecn. 1.24
- III.- Paralelepípedo, resistencias externas despreciables y el primer término de la serie 1.28.

Utilizando los datos para las condiciones experimentales de $L/D=0.5$, $U_f=240$ cm/seg y $T_e=30^\circ\text{C}$.

Mediante mínimos cuadrados, linealizando la ecn. 1.22 y tomando el primer término de la misma, el valor de la pendiente de la recta es:

$$b = - 0.0050336$$

I.- Despejando el D_m de la ecn. 1.22 se obtiene:

$$D_m = \frac{(0.0050336)(0.093)}{\pi^2} = 4.731 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{min}$$

2.- De la ecn. 1.28, linealizando y tomando el primer término nos da:

$$D_m = -b/ 149.0741131$$

donde el cociente se obtiene de las longitudes características que son:

$$x = 0.4765 \text{ cm}$$

$$y = 0.21875 \text{ cm}$$

3.- De la ecn. 1.24, con un sólo término:

De la recta:

$$Y = -0.44159 \text{ (ordenada en el origen)}$$

$$P = -0.0050336 \text{ min}^{-1} \text{ (valor de la pendiente experimental)}$$

$$Y = \text{Ln} \frac{6 \text{ Bi}^2}{\lambda^2 [\lambda^2 + \text{Bi}(\text{Bi}-1)]}$$

Si $\lambda = 2.8363$, $\text{Bi} = 10$

$Y_1 = -0.27349357$, por lo tanto se realiza una nueva iteración.

de este modo se siguen probando distintos valores de λ y Bi hasta que se satisfaga la ecuación de la recta.

Para este caso:

$\text{Bi} = 86.7908$, $\lambda = 3.07$ (datos para el modelo) entonces, D_m se calcula a partir de P ;

$$D_m = PR^2 / \lambda^2$$

$$D_m = 4.97 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{min.}$$

En la Fig. 1 se pueden observar los resultados de la comparación.

Los valores de Bi y λ se localizan en la Tabla 2.

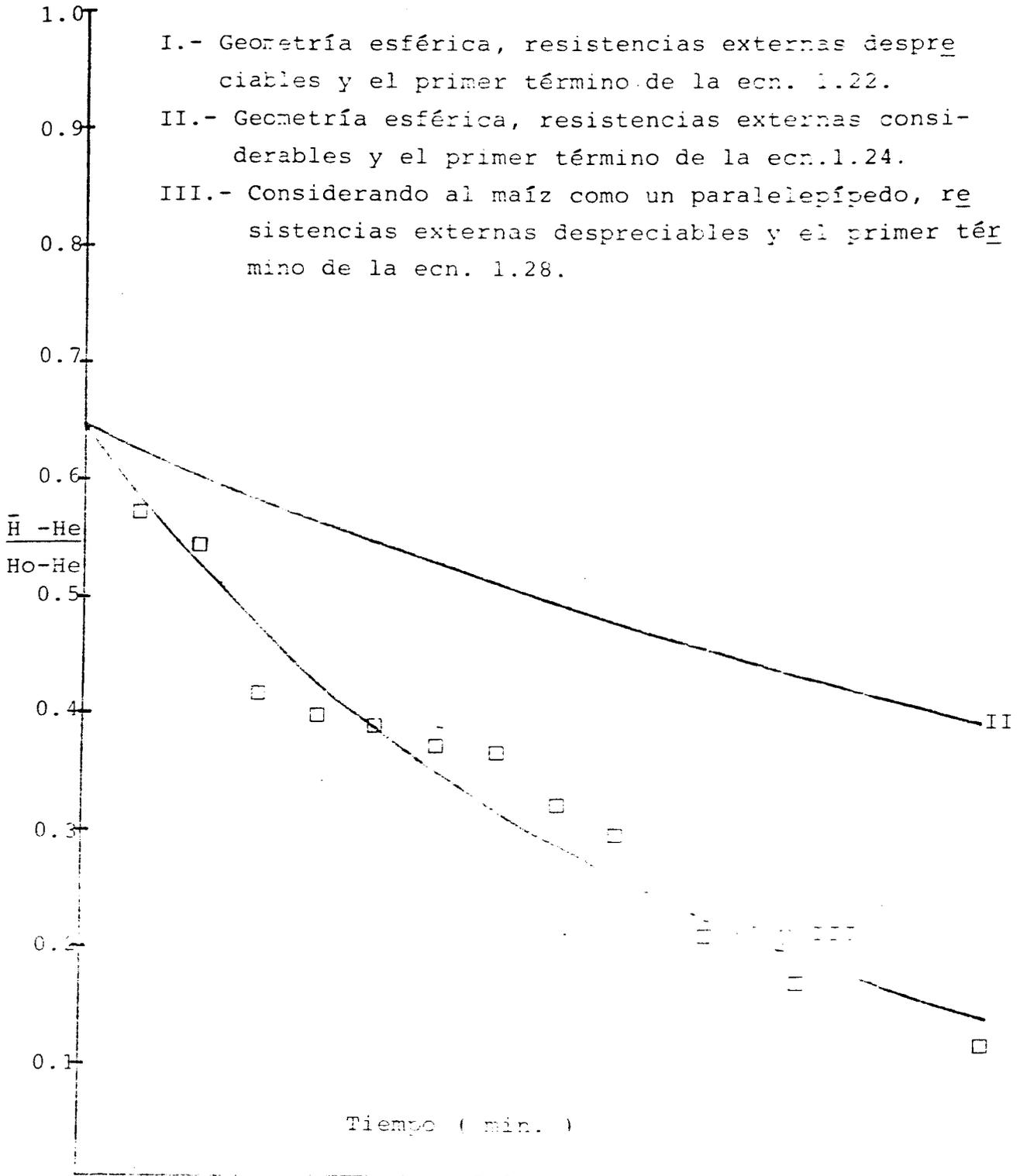


Fig. 1.- Comparación de los casos estudiados para el modelo.
 $Pr = 0.5$, $U_1 = 240$ cm/seg, $T_e = 37^\circ \text{C}$.

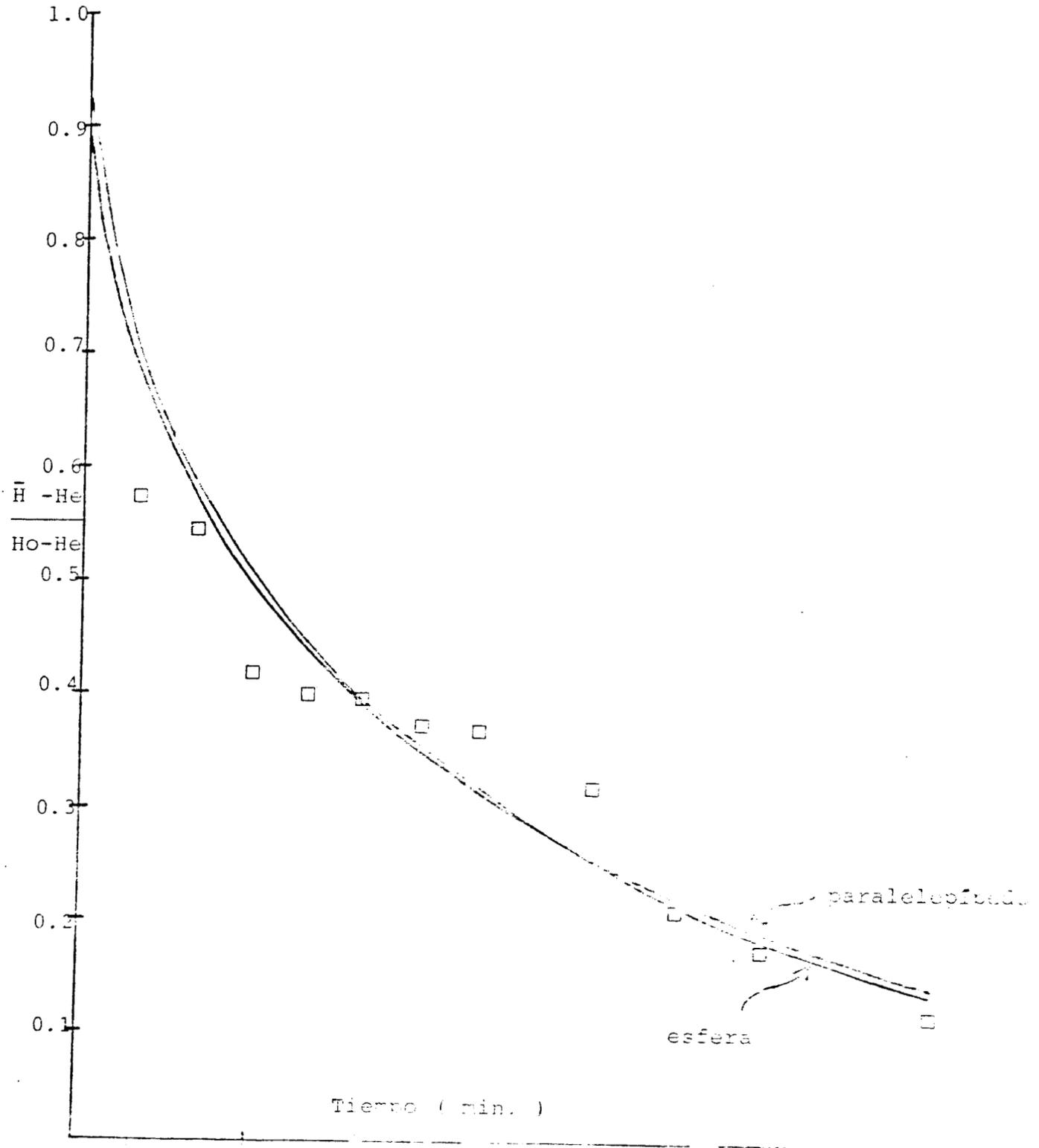


Fig.2.- Modelo de difusión molecular para una esfera y para el paralelepipedo. $L/D=0.5$, $U_f=240$ cm/sec y $T=100$.

Datos de λ_n correspondientes a un B_i .

	λ_n				
B_i	1	2	3	4	5
1	1.5708	4.7124	7.8540	10.9956	14.1372
2	2.0288	4.9132	7.9787	11.0856	14.2075
5	2.5704	5.3540	8.3029	11.3349	14.4080
10	2.8363	5.7172	8.6587	11.6532	14.6870
100	3.1102	6.2204	9.3309	12.4414	15.5522
	3.1416	6.2832	9.4248	12.5664	15.7080

Tabla 2.- Valores de λ correspondientes a un B_i ⁽¹⁸⁾ .

B I B L I O G R A F I A .

- 1.- Rivera Brechu, M.E. Evaluación de las condiciones de almacena
miento y de la calidad física del maíz que se emplea en los mo
linos de nixtamal del Distrito Federal. Tesis Lic. en Nutrición
y Ciencia de los Alimentos. Universidad Iberoamericana. 1983.
- 2.- Comisión Nacional de la Industrialización del maíz para Consu
mo Humano, La Industria del Maíz (1970-1976), CONAIM, México, D.F.
1977.
- 3.- López Portillo y Pacheco, J. Sexto Informe de Gobierno, Sección
Agropecuaria, Secretaría de Programación y Presupuesto, México,
D.F., 1982, p.25.
- 4.- Ramírez, M. Almacenamiento y Conservación de Granos y Semillas,
Ed. CECSA, México, D.F. 1980.
- 5.- Ramírez Genel, M. Infestación de Campo por Insectos de Granos
Almacenados. Agricultura Técnica, p.32.1960.
- 6.- Jamieson, M. y Jobber, P. Manejo de los Alimentos. Vol.1. Eco-
logía del almacenamiento. 1981.
- 7.- Adem, E. y Bourges, H. Cambios en la concentración de algunos
componentes del grano de maíz infestado por Prostephanus trunca
tus, Horn, Sitophilus zeamais, Mots, y Sitotroga cerealella, O-
liver. Archivos Latinoamericanos de nutrición. Vol.XXXI (Junio
1981), No.2.

- 8.- Dermott, T. y Evans , D.E. An Evaluation of Fluidized Bed as a Means of Desinfesting Wheat. J.Stored Prod. Res., 14, 1, 1977.
 - 9.- Labuz, T.P. Sorption phenomena in Foods. Food Technology.Vol. 22, p.263. 1968.
 - 10.- Iglesias, H.A. y Chirife, J.A. A Model for describing the water sorption behavior of foods. Journal of Food Science. Vol.41, p.984.1976.
 - 11.- Labuza,T.P. , Acott, K.,Tatini, S.R. Water Activity determination: a collaborative study of different methods. Journal of Food Science. Vol.41.p.919.1976.
 - 12.- Vizcarra Mendoza, M.G. Determinación experimental de coeficientes de transferencia de masa y calor en un lecho fluidizado - sólido-gas. Tesis Maestría en Ing. Química. Universidad Nacional Autónoma de México. 1976.
 - 13.- Levenspiel, O. y Kunii, D. Fluidization Engineering. John Wiley and Sons., Inc. 1969.
 - 14.- Davidson, J.F. and Harrison, D, Fluidization. Academic Press. 1971.
 - 15.- McCormick, P.Y.1979. Gas Solid Systems. cap.20.p.17. Chemical Engineers Handbook (Eds.) R.H.Perry and C.H.Chilton.5a.Ed. McGraw Hill, N.Y.
 - 16.- Harper,J.C. Elemts of Food Engineering. cap.12.The Avi Publishing Company Inc. 1976.
-
-

- 17.- Heertjes, P.M. and McKibbins, J.W. The Partial coefficient of Heat Transfer in a Draying Fluidized Bed. Chemical Engineering Science. Vol.5.p.161.1956.
 - 18.- Peraza Campos, A.L. Separación de orujo de uva y deshidratación de la semilla en un secador de lecho fluidizado. Tesis - Químico Farmacéutico Biólogo. Universidad Nacional Autónoma de México. 1983.
 - 19.- Crank, J. The Mathematics of difussion. Clrendon Press.1975.
 - 20.- Brennan, J.G., Butters, J.R. , Cowell, N.D. y Lilly A.E.V. Food Engineering Operations. 2a. edición.Applied Science Publishers LTD. 1976.
 - 21.- Escardino, A., Ruiz, F. y Mira, F. Mecanismo y cinética del secado de maíz en grano con aire caliente. A.T.A. Vol.11. No.4. 1971.
 - 22.- McCune, T.D., Lang, K.W. and Steinberg, M.P. Water Activity Determination with the Proximity Equilibration Cell. Journal of Food Science. Vol.46.1981.
 - 23.- LeCato, G.L. Species composition influence insect population and weight loss of stored rice, wheat and corn. Journal of the Kansas Entomological Society. Vol. 48. No.2 .April 1975.
 - 24.- Torreblanca, A., Bourges, H. y Adem, E. Pérdidas producidas por *Prostephanus truncatus* (horn) en maíz almacenado bajo condiciones de laboratorio. Tecnología de alimentos. Vol.18.No.6.1982.
 - 25.- Witehouse, S.A., Picos, J. Manual de Técnicas para el análisis de -
-

los alimentos. Universidad Iberoamericana.1984.

- 26.- Osborne,D.R., and Voogth,P. The Analysis of Nutrients in Food. Academic Press. 1978. p.130, secc.4.
- 27.- López Portillo y Pacheco, J. Anexo I. Sexto Informe de Gobierno Secretaría de Programación y Presupuesto, Sección Agropecuaria. México, D.F. 1982.