



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"SEPARACION DE ORUJO DE UVA Y DESHIDRATACION
DE LA SEMILLA EN UN SECADOR
DE LECHO FLUIDIZADO".

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Químico Farmacéutico Biólogo

P R E S E N T A:

Ana Lilia Peraza Campos

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

	Nomenclatura	1
	Lista de cuadros, figuras y tablas	4
I.	Introducción	5
II.	Antecedentes	10
2.1.	Generalidades sobre el orujo de uva	11
2.2.	Generalidades sobre el lecho fluidizado	18
III.	Marco teórico	23
3.1.	Isotermas de desorción	24
3.2.	Separación	31
3.3.	Teoría de secado	36
IV.	Materiales y métodos experimentales	46
4.1.	Determinaciones previas	47
4.2.	Determinación de isotermas de desorción	49
4.3.	Determinaciones en el lecho fluidizado	52
V.	Presentación y discusión de resultados	62
5.1.	Tratamientos previos al orujo	63
5.2.	Isotermas de desorción	65
5.3.	Separación	70
5.4.	Secado de semillas de uva	85
5.5.	Eficiencia térmica	104
VI.	Conclusiones	107
	Apéndices	112
	Bibliografía	139

NOMENCLATURA.

- a: actividad de agua
- A: área de transferencia (cm^2)
- a_{g_0} : área de la molécula de agua (m^2)
- b: parámetro del modelo de Halsey
- C: concentración de sólidos en el lecho = g sólidos en el lecho / g sólidos iniciales
- C_0 : concentración inicial de sólidos en el lecho
- C^* : concentración crítica de sólidos en el lecho
- d_p : diámetro promedio de la partícula (cm)
- D: coeficiente de difusión interna del líquido (cm^2/min)
- e: efecto
- F: constante del modelo de BET
- g: aceleración de la gravedad (cm/min^2)
- h: coeficiente de transferencia de calor en la interfase sólido-gas ($\text{Kcal}/\text{hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
- H: humedad absoluta del aire (g H_2O /g aire seco)
- H_e : altura del lecho expandido (cm)
- HR: humedad relativa
- J: constante del modelo de Wenzel
- k: constante de velocidad de separación (min^{-1})
- k' : coeficiente de acomodo / factor de frecuencia ≈ 1
- k'' : coeficiente externo de transferencia de masa en la superficie del sólido (cm/min)
- k_{fg} : coeficiente de transferencia de masa en la interfase sólido-gas (período de secado constante) (cm/min)

- K_c : coeficiente externo de transferencia de masa (período de secado decreciente) (cm/min)
- L : no. de Biot
- L/D : relación altura/diámetro del lecho fijo
- m : contenido de humedad (g H_2O /g sólido seco)
- m_e : contenido de humedad de equilibrio (g H_2O /g sólido seco)
- m_m : contenido de humedad de la monocapa (g H_2O /g S.S.)
- m_0 : contenido de humedad inicial (g H_2O /g sólido seco)
- m^* : contenido de humedad reducido
- M_{H_2O} : peso molecular del agua (g/g mol)
- n : constante del modelo de Henderson
- N_0 : no. de Avogadro
- p : presión de vapor de agua del alimento (atm)
- p^o : presión de vapor (atm)
- p_w : presión parcial de agua en el gas de secado (atm)
- P_0 : presión de vapor de agua pura (atm)
- PM : peso molecular promedio de antocianinas (g/g mol)
- Q : gasto de aire (m^3/hr)
- Q_s : calor de desorción (Kcal/mol)
- q : parámetro del modelo de Halsey
- r : distancia radial del centro a la superficie de la partícula (cm)
- R : radio promedio de la partícula (cm)
- \bar{R} : constante de los gases
- S_m : superficie de la monocapa (m^2/g sólido seco)
- S.S.: sólido seco
- t : tiempo (min)

- T:** temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ($^{\circ}\text{K}$)
T_a: temperatura de entrada del secador ($^{\circ}\text{C}$)
T_b: temperatura de salida del secador ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Dh}: temperatura de bulbo húmedo ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Ds}: temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$)
T_i: temperatura del aire a distintas posiciones en el lecho ($^{\circ}\text{C}$)
T_l: temperatura de las partículas en el lecho ($^{\circ}\text{C}$)
T_p: temperatura arriba del plato distribuidor ($^{\circ}\text{C}$)
V_a: velocidad superficial del aire (cm/min)
V_{fm}: velocidad de fluidización mínima (cm/min)
V_t: velocidad terminal (cm/min)
v_t: volumen total del lecho a fluidización mínima (cm³)
v_p: volumen total de las partículas (cm³)
x: distancia (cm)
- β :** raíces positivas del no. de Biot
 ΔP_v : calor de vaporización (Kcal/mol)
 ΔP_d : caída de presión del plato distribuidor (cm H₂O)
 ΔP_L : caída de presión real del lecho (cm H₂O)
 ΔP_t : caída de presión total (cm H₂O)
 ϵ_{fm} : fracción vacía del lecho en fluidización mínima
 $\theta:$ n/n_m
 $\mu:$ viscosidad del aire (g/cm min)
 $\epsilon:$ coeficiente de extinción de antocianinas (l/g mol)
 $\rho_a:$ densidad del aire (g/cm³)
 $\rho_s:$ densidad del sólido (g/cm³)
 $\phi:$ esfericidad de la partícula

LISTA DE CUADROS, FIGURAS Y TABLAS.

- Fig. 1.1. Estados con producción de uva.
- Cuadro 1.1. Producción y superficie cultivada de uva en México.
- Cuadro 2.1. Distribución de productos aprovechables de uva.
- Cuadro 2.2. Proceso de obtención de aceite de uva.
- Cuadro 2.3. Composición química del aceite de semilla de uva y algunas características físico-químicas.
- Cuadro 2.4. Obtención de proteína de semilla de uva.
- Fig. 3.1. Isotermas de adsorción y desorción.
- Fig. 3.2. Comportamiento del calor total de desorción con respecto al contenido de humedad.
- Fig. 3.3. Caída de presión del lecho contra la velocidad superficial del aire.
- Fig. 3.4. Modelo de Leva para predecir la velocidad de separación.
- Cuadro 4.2. % de humedad relativa de soluciones saturadas de sales a diferentes temperaturas.
- Fig. 4.3. Diagrama de flujo.
- Fig. 5.1. Isotermas de desorción para semilla de uva.
- Fig. 5.2. Modelo de BET (monocapa experimental).
- Fig. 5.3. $\ln a$ vs. $1/^\circ K$.
- Fig. 5.4. Comportamiento del calor de desorción con respecto al contenido de humedad (experimental).
- Figs. 5.5. Caída de presión vs. velocidad superficial del -
a 5.8. aire para los componentes del orujo de uva.
- Figs. 5.9. Fracción de sólidos secos vs. tiempo para distin
a 5.11. tas condiciones de trabajo.
- Tabla 5.1. Constante de velocidad de separación.
- Figs. 5.12. Fracción de sólidos en el lecho vs. contenido de
a 5.20. humedad de los mismos para distintas condiciones de trabajo.
- Figs. 5.21. Curvas de secado modeladas experimentales para -
a 5.30. distintas condiciones de trabajo.
- Fig. 5.31. $\ln m^*$ vs. tiempo.
- Fig. 5.32. Esquema del procedimiento de cálculo de los coeficientes de transferencia de masa.
- Tablas 5.2. Efecto de distintas variables sobre los coeficien
a 5.4. tes de transferencia de masa.
- Fig. 5.33. Modelo de Arrhenius. Comportamiento de D con respecto a T .
- Fig. 5.34. Efecto del plato distribuidor a distintas velocidades superficiales de aire.

I. INTRODUCCION.

En México, la industria vitivinícola se ha incrementado significativamente en estos últimos años. Esta industria genera una gran cantidad de desperdicios, que pueden ser procesados para obtener otros subproductos de interés industrial. Dentro del proceso de aprovechamiento del orujo de uva, desecho obtenido previamente al proceso de vinificación, se encuentran operaciones que no han sido aún estudiadas con la suficiente profundidad, como son: la separación de los componentes del orujo y el secado de la semilla. Dichas operaciones se localizan en un punto crucial del proceso del aprovechamiento integral del orujo, como se indica más adelante en este trabajo. Este proceso, a partir del cual se obtienen distintos subproductos, no ha sido explotado en nuestro país, a pesar de presentarse como fuente de distintos productos alimentarios que puedan ser complementarios o sustitutos de los ya existentes en el mercado o mejores que ellos.

Por el gran auge de la industria vitivinícola, el área destinada al cultivo de la vid, ha sido objeto de un incremento notable en los últimos años, como podemos observar en el aumento de la superficie cultivada desde el año 1930 hasta el año de 1980, que pasó de 2 850 Has. a 55 773 Has. En el cuadro no. 1.1. se presentan los datos de la producción y de la superficie cultivada desde 1930 hasta 1980.

Presentamos además un mapa de la República Mexicana-

na donde se localizan las zonas de producción de uva.

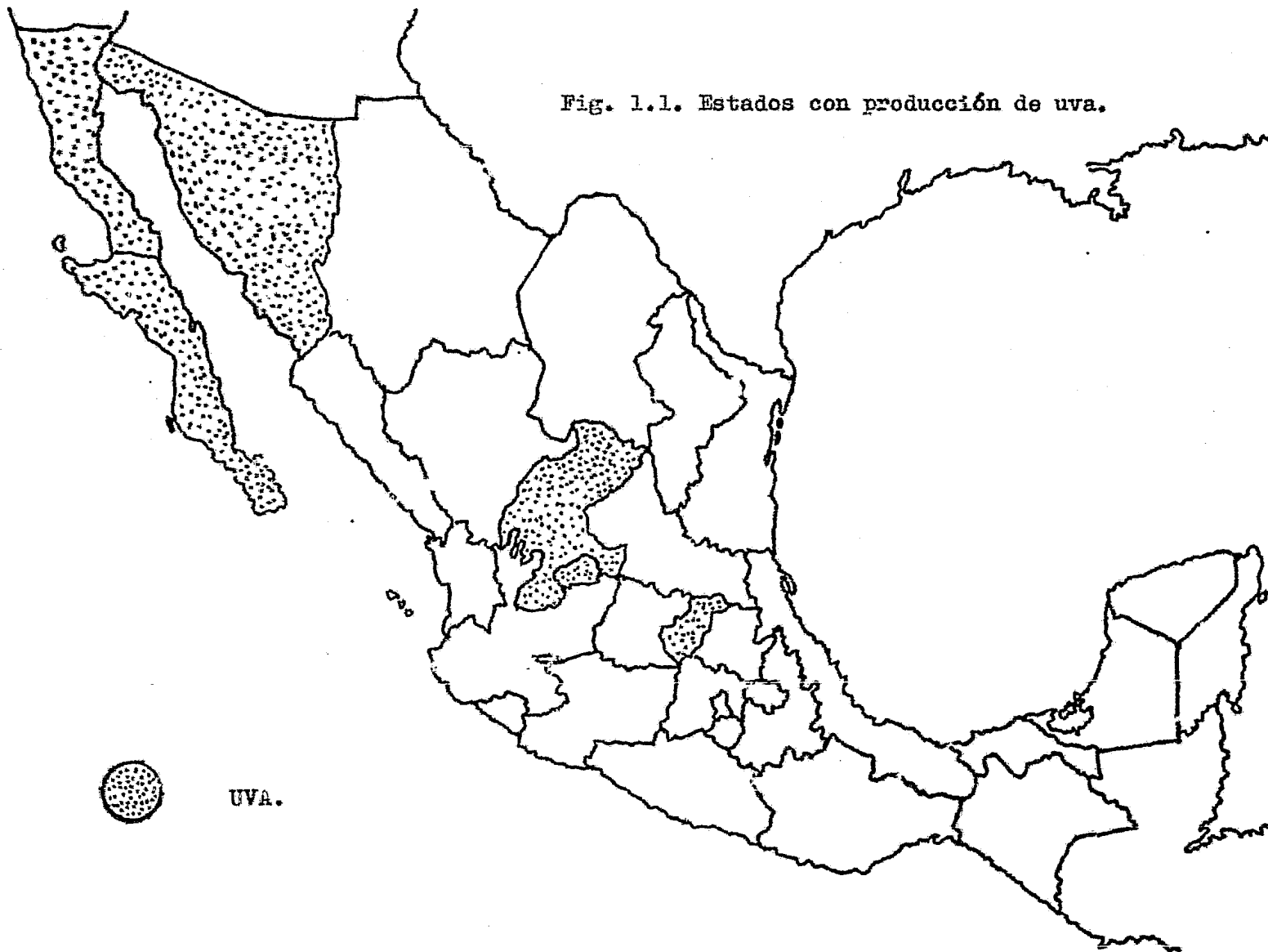
En México, el 75% pertenece a viñedos en producción y el 25% restante corresponde a viñedos jóvenes que se encuentran en período de formación (Del Cañizo, 1981).

Para 1980 se produjeron aproximadamente 550 000 ton de uva de las cuales, el 65 % fueron destinadas a la industria: 38 750 ton para su transformación en vinos de mesa y - vinos generosos, 301 730 ton para brandy y 26 020 ton para la producción de pasitas. Este 65 % producen 47 000 ton de orujo de uva.

Estos desechos nos permiten concluir que hay una gran cantidad de ellos, que no han sido utilizados aún. La utilización de estos desechos conlleva a reducir la contaminación ambiental y a recuperar todo lo económicamente benéfico. Del grupo de subproductos generados durante el procesamiento del vino, se aprovechan solo algunos: tartratos, etanol y big-masa. Sin embargo, tanto de la semilla como del hollejo se puede extraer, entre otros productos, respectivamente, aceite comestible y antocianinas.

En este marco debe subrayarse la necesidad de estudiar las operaciones que podrían intervenir en este aprovechamiento. En los países que realizan su industrialización, la separación del hollejo y la semilla y su posterior deshidrata

Fig. 1.1. Estados con producción de uva.



Cuadro no. 1.1.

Producción y superficie cultivada de uva en México.

AÑO	PRODUCCION Ton/año	Has. CULTIVADAS.
1930	21 220	2 850
1940	60 170	6 000
1950	30 000	7 732
1960	110 000	12 000
1970	227 800	23 000
1980	550 000	55 773

Fuente: Guadarrama, 1983.

ción se han llevado al cabo con equipos que demandan una alta inversión y gasto de energía. Nuestro objetivo es definir las condiciones de secado y separación simultáneas en un equipo de lecho fluidizado. El conocimiento de las particularidades de este fenómeno permitirá, eventualmente, un mejor diseño del equipo a emplearse en la industrialización del orujo con vistas a su aprovechamiento integral.

II. ANTECEDENTES.

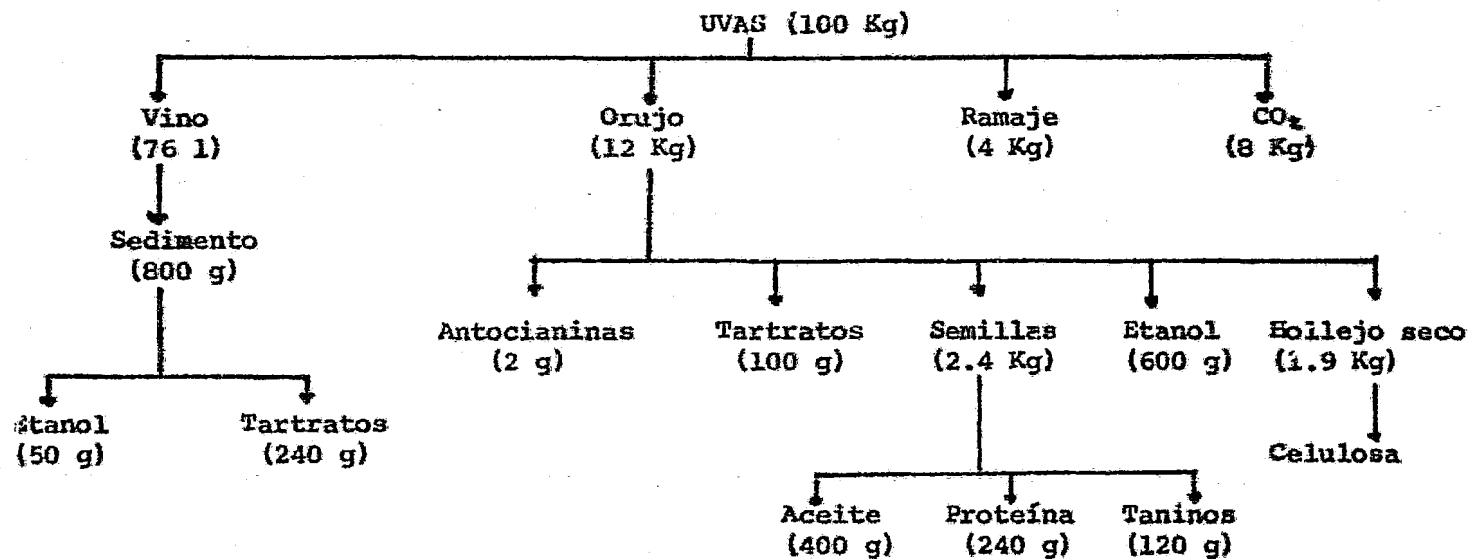
2.1. Generalidades sobre el orujo de uva.

La elaboración de vino, brandy, jugo, jalea o mermelada de uva produce de 12 a 16 % de orujo como residuo, el cual puede ser aprovechado en distintas formas. (Fantozzi et al, 1979).

El orujo de uva, compuesto por la semilla y el hollejo o piel de la uva, puede ser una fuente importante de subproductos de interés industrial: alcohol, antocianinas, cremor-tártaro y semillas. De estas últimas, a su vez, se puede obtener aceite, taninos y proteína. (Fantozzi et al, 1979). Sin embargo, en nuestro país, el aprovechamiento tradicional del orujo de uva cuando ha tenido lugar, ha sido como forraje, a pesar de no presentar un alto valor nutritivo, como texturizador de suelos o solo se quemaba como combustible (B. Guadarrama, 1983). Debe señalarse que en la mayoría de los casos el orujo tratado, para su aprovechamiento integral, podría ser reutilizado para cumplir funciones de texturizador de suelos. (Vogt, 1972).

Los subproductos que pueden ser obtenidos a partir de 100 Kg de uva se muestran en el cuadro 2.1. En este cuadro se señalan estos subproductos y se indican cantidades estimadas de los mismos. Por supuesto estas cantidades varían con respecto al tipo de uva, a las características de ésta y a los tratamientos que se seleccionen en función del subproducto al

Cuadro no. 2.1. Distribución de productos aprovechables de la uva.



Fuente: Fantozzi et al, 1979.

que se quiera dirigir la extracción (Amerine et al, 1960).

Los diferentes ataques para el aprovechamiento integral del orujo se describen a continuación. Cada uno de ellos contempla la extracción prioritaria de alguno de sus componentes y bajo este nombre los hemos clasificado. Como se observará algunas de estas vías no son excluyentes por lo que en muchos casos es posible diseñar la política de aprovechamiento de tal forma que se obtenga más de uno de los subproductos señalados.

- a) alcohol.- este tratamiento consiste en el lavado del orujo con agua para la extracción de azúcares. Una vez lavado, el orujo se drena y el agua residual es fermentada y destilada para obtener alcohol (Amerine et al, 1960).
- b) tartratos.- para la extracción de tartratos es necesario usar agua acidulada en cantidades no mayores a tres veces el peso del orujo; una cantidad mayor haría necesario concentrar el agua residual. También es posible el uso de corrientes de vapor como medio de extracción (Amerine, 1960). Una vez clarificado el líquido, los tartratos se precipitan con Ca(OH)_2 y CaCl_2 o con KOH recuperándose en forma de bitartrato de calcio o potasio. Para obtener mayores rendimientos en la recuperación, el líquido clarificado se deja reposar un tiempo y se puede refrigerar durante el reposo.

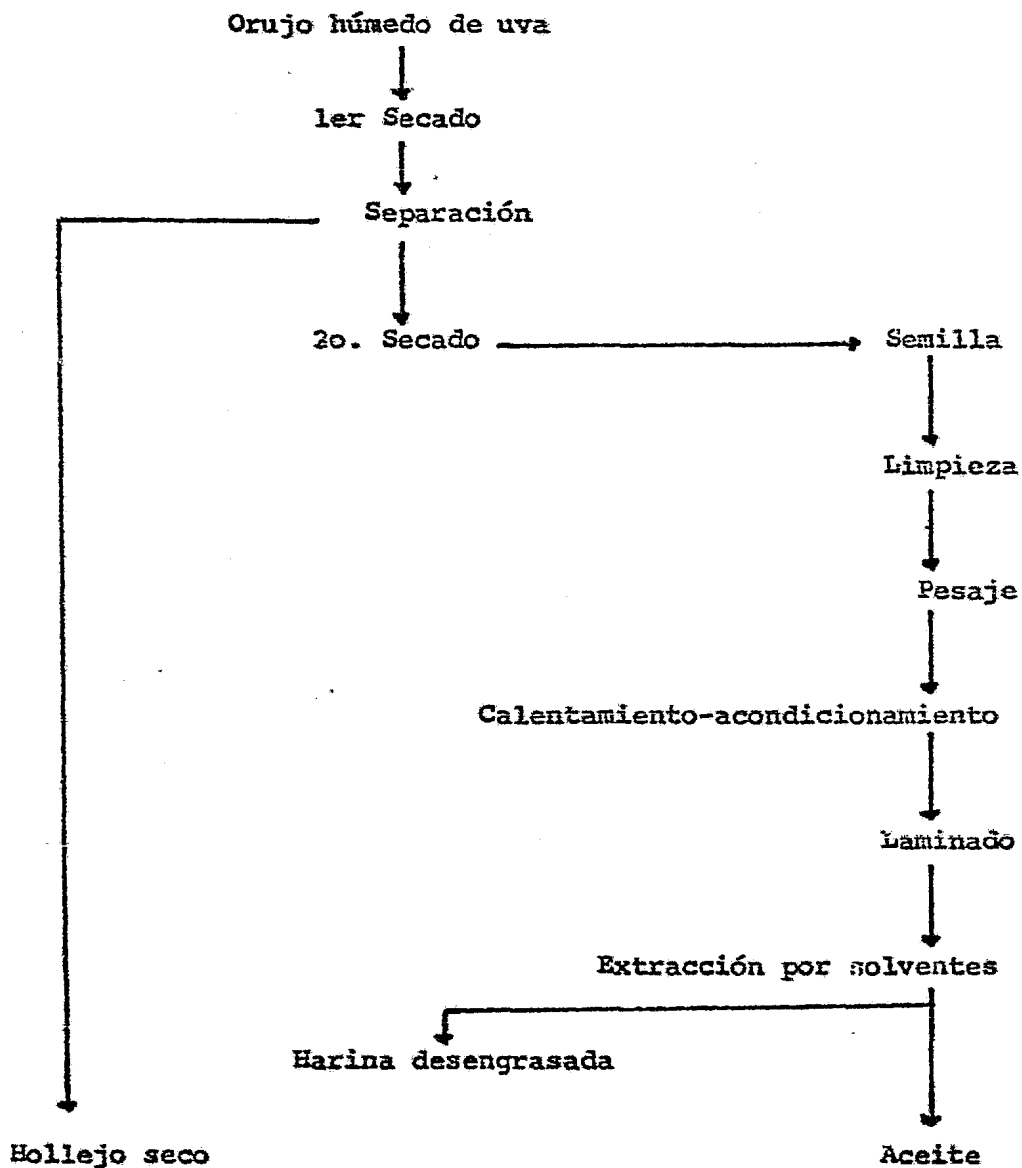
Alternativamente, se pueden utilizar resinas de intercambio iónico con altos rendimientos; después de realizar la extracción, las aguas de lavado son concentradas y pasadas por una columna de intercambio iónico (Matchett et al, 1944).

c) antocianinas.- una mezcla de ácido con solventes es empleada en la recuperación de estos colorantes. El grado de extracción de antocianinas está en función de la naturaleza de la mezcla usada; esto es, del tipo de ácido, solvente y de sus concentraciones. Mezclas de metanol con ácido cítrico al 5 % y HCl en agua al 1 %, entre otras dan buenos resultados (Metivier et al, 1980). Después de realizar la extracción el líquido residual se concentra en un evaporador, dando un concentrado que puede ser o no secado por aspersion y así obtener los colorantes en forma de polvo.

Como residuo de estos tres procedimientos queda orujo agotado el cual puede ser también aprovechado. Ya sea como celulosa en la fabricación de papel o en la obtención de otros subproductos (Vogt, 1972).

d) semillas.- el método tradicional de obtención de semillas, se realiza lavando varias veces el orujo con grandes cantidades de agua. El orujo lavado es drenado, cribado para separar el hollejo de las semillas y finalmente secado en tambores rotatorios. El hollejo que permanece unido a las semillas es eliminado haciendo pasar una corriente de aire (Ame-

Cuadro 2.2. Proceso de obtención de aceite de uva.



Fuente: E. Bernardini, 1971.

rine et al, 1960).

Cabe señalar en este punto de la discusión que el orujo agotado, subproducto de los tratamientos anteriores, puede ser utilizado para la separación de la semilla y su eventual aprovechamiento integral. El tipo de tratamiento que haya recibido el orujo influirá determinadamente en la facilidad con que se lleve al cabo la separación.

Para la obtención de aceite, la semilla seca puede ser procesada por prensado, con solventes o mediante una combinación de ambas operaciones. Para mejorar el rendimiento, en la extracción por prensado, la semilla se tuesta (Fantozzi, 1979).

En el cuadro 2.2., se señalan las operaciones del proceso que se sigue para la obtención de aceite por extracción con solventes partiendo de orujo húmedo sea o no agotado. En este caso la semilla debe ser laminada para aumentar la eficiencia de recuperación. Para facilitar esta laminación, la semilla se calienta y humidifica hasta que adquiera una constitución más plástica; este tratamiento que sustituye al trozado, da mejores rendimientos (Bernardini, 1971).

Para realizar una óptima extracción del aceite, las operaciones se lleva al cabo en dos etapas. En la primera, la extracción se realiza por percolación y posteriormente se emplea un sistema de inmersión (Bernardini, 1971).

En la actualidad se procesa industrialmente la semi-

Cuadro 2.3. Composición química del aceite de semilla de uva
y algunas características fisicoquímicas.

Acido graso:	%
Palmítico	7.0 a 9.5
Esteárico	3.5 a 5.5
Aráquico	0.1 a 0.2
Palmitoleico	0.2 a 0.6
Oleico	15 a 20
Linoleico	64 a 74
Linolénico	0.2 a 0.4
	mg/100 g
Tocoferoles	73 a 130
Esteroles	290 a 575
Propiedades fisicoquímicas:	
Índice de iodo	130 - 145
Acidez libre	1.5 - 1.8
Índice de saponificación	187 - 193
Densidad (25°C)	0.9165 - 0.9211
Índice de refracción (25°C)	1.4729 - 1.4751

Fuente: Kinsella, 1974 y Bernardini, 1971.

la de uva para la obtención del aceite en algunos países como: Italia, U.R.S.S., Hungría, España, Francia, Alemania, E.E.U.U. y Argentina (Bernardini, 1971). Este aceite tiene una gran cantidad de ácido linoleico (C 18:2 A9, 12) como se puede observar en el cuadro 2.3. El ácido linoleico es un ácido graso esencial insaturado que presenta una alta actividad biológica (Badi, 1981).

Una vez extraído el aceite, la semilla puede ser tratada para obtener proteína, como muestra el cuadro 2.4. Esta experiencia solo se ha realizado a nivel de laboratorio (Fantozzi et al, 1979).

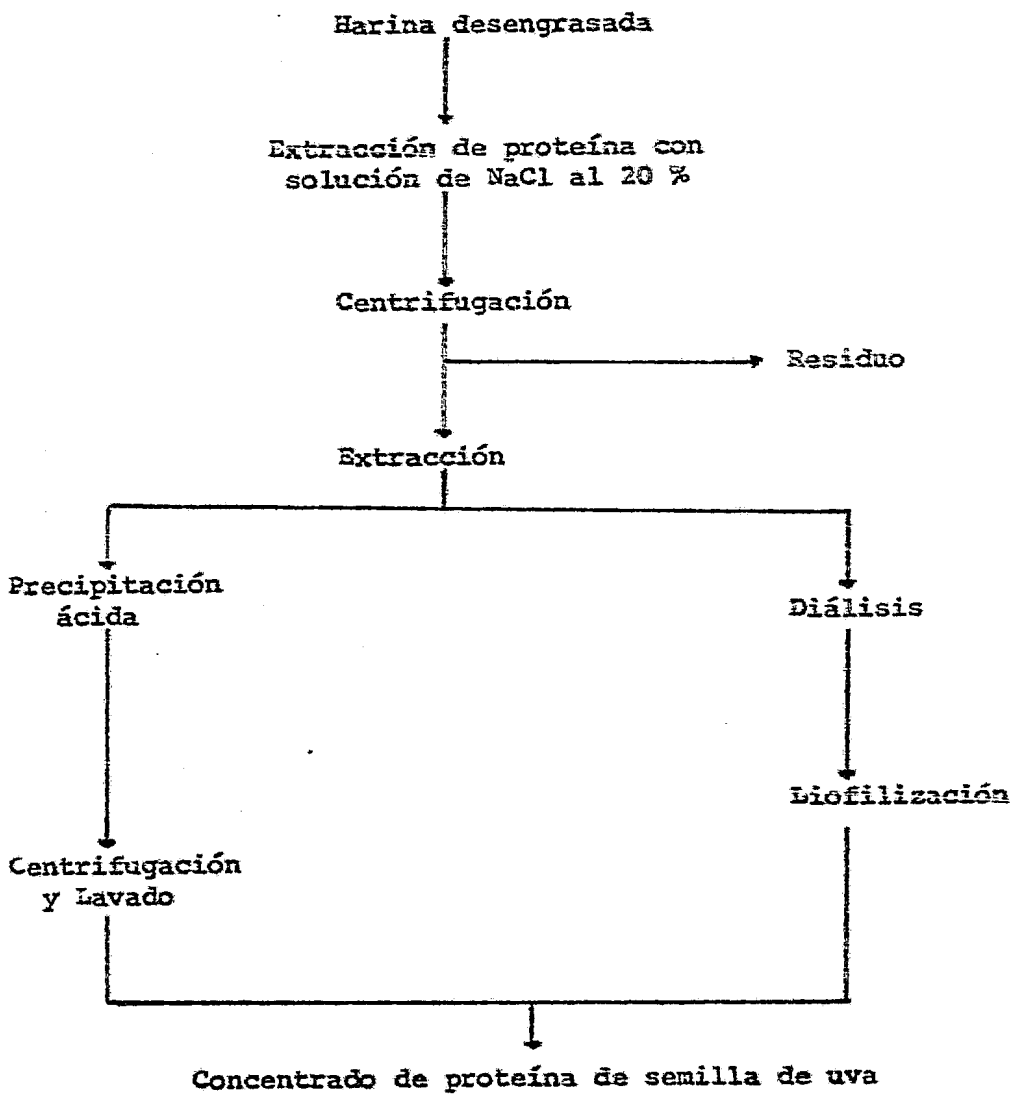
También hay reportes de recuperación de taninos. Sin embargo, los rendimientos alcanzados son bajos y los datos proporcionados son muy escuetos y solo hablan de una extracción con alcohol o acetona a la harina desengrasada (Amerine, 1960).

2.2. Generalidades sobre el secador de lecho fluidizado.

Como se ha señalado con anterioridad, el aprovechamiento del orujo de uva requiere del secado y la separación de la semilla después de algún tratamiento de lavado.

En el siglo pasado, se acostumbraba secar el orujo en los patios del viñedo, pero esta práctica cayó en desuso dando paso al secado controlado con secadores rotatorios. En un principio, la separación se lleva al cabo por tamizado y a continúo

Cuadro 2.4. Obtención de proteína de semilla de uva.



Fuente: Fantozzi et al, 1979.

ción se utilizan corrientes de aire para eliminar las pequeñas partículas de hollejo que quedan unidas a la semilla.

Un método alternativo para estas dos operaciones consiste en emplear un secador de lecho fluidizado, en el cual el hollejo puede ser separado y la semilla deshidratada hasta el contenido de humedad deseado.

La fluidización se podría describir como una operación en la que las partículas sólidas adquieren las propiedades de un fluido. Consiste en hacer pasar un gas a través de un lecho de partículas sólidas a un gasto suficientemente alto - para provocar que las partículas queden suspendidas (Vizcarra, 1974).

Las aplicaciones de los lechos fluidizados, en los alimentos, son diversas; entre ellas se pueden señalar el arrastre de sólidos o transporte neumático de sólidos, secado, mezclado, blanqueado, refrigeración, congelación y tostado entre otras (Baxerres et al, 1982).

Describiendo brevemente algunas características del fenómeno de fluidización, se puede decir que:

- a) se considera un lecho fijo cuando el gas fluye a través de los espacios vacíos sin mover las partículas.
- b) cuando las partículas empiezan a moverse se le denomina fluidización mínima.
- c) finalmente si la velocidad del flujo es muy alta, hasta el -

grado de que las partículas alcanzan a ser arrastradas, el lecho llega a un estado de fluidización con arrastre de sólidos o transporte neumático de sólidos.

Las características del secador de lecho fluidizado son las siguientes (Sloan et al, 1967):

1. el gas usado como medio de deshidratación proporciona un gran movimiento a las partículas sólidas, lo cual favorece el mezclado y la transferencia de masa,
2. la temperatura a través del lecho es uniforme,
3. la transferencia de calor es muy rápida,
4. el sólido húmedo recibe calor directamente del gas caliente por convección,
5. el sólido húmedo además recibe calor por conducción al ponerse en contacto con la pared del recipiente y con el plato distribuidor.

En conclusión, el secador de lecho fluidizado es un equipo en el cual se pueden obtener altas transferencias de masa y calor. Un equipo semejante se utiliza en el secado de arroz sncochado, donde fue posible reducir los tiempos de secado (Lequerica et al, 1974).

Otros estudios importantes han sido los secados de malta (Brunello et al, 1974), papa, zanahoria y arroz (Baxerres, et al, 1982). En el estudio de la deshidratación de malta se encontró que era factible usar mayores temperaturas que las permitidas en otro tipo de secadores, sin causar daño alguno a la

malta, como resultado de la mayor velocidad de secado. Además el uso de este tipo de secador permite eliminar trozos de cascarilla residuales.

El trabajo de Baxerres et al, analiza el uso de un equipo de lecho fluidizado como secador de productos alimenticios con distintas geometrías y con problemas de pegajosidad al principio del secado, debido al almidón presente y a los altos contenidos de humedad iniciales. Este problema fue resuelto agregando material inerte a la carga del secador con lo cual se obtenía una fluidización apropiada, evitando la formación de aglomerados del material al inicio de la operación.

En todos estos estudios se ve el interés, cada vez mayor, de utilizar el equipo de lecho fluidizado como secador por las distintas ventajas que presenta para la industria alimentaria. En razón de la validez de estos trabajos, se seleccionó este equipo para el estudio de la separación del orujo de uva y el secado de la semilla.

III. MARCO TEORICO.

3.1. Isotermas de desorción.

3.1.1. Fundamentos.

En el estudio de deshidratación de alimentos, el contenido de humedad presente en ellos es un factor importante por su efecto tanto en el procesamiento como en la estabilidad posterior del producto seco durante su almacenamiento. Las isotermas de desorción nos permiten conocer hasta que contenido de humedad es posible llegar, trabajando con aire a temperatura y a humedad relativa específicas. En otras palabras las condiciones de equilibrio al final del secado pueden predecirse por dichas isotermas.

Cada alimento, a una temperatura determinada, presenta un contenido de humedad en equilibrio con la humedad relativa del ambiente que lo rodea. El conocimiento de una serie de datos sobre la humedad relativa y el contenido de humedad en el equilibrio, nos permiten trazar una isoterma de desorción; esto es, una curva que relacione el contenido de humedad y la actividad de agua del material, curva donde la actividad de agua está definida por la siguiente relación (Labuza, 1968):

$$a = p/p_0 = \% \frac{HR}{100} \quad (3.1.1.)$$

en la cual;

- a = actividad de agua,
- p = presión de vapor de agua del alimento a T,
- p₀ = presión de vapor del agua pura a T,
- HR = humedad relativa del aire en la cual no se pierde ni gana agua,
- T = temperatura de equilibrio del sistema .

En la figura 3.1. se muestran isotermas de adsorción y desorción. Como se observa, los caminos de adsorción y desorción en el caso presentado no son los mismos. Cuando esto sucede se dice que se presenta el fenómeno de histéresis.

La isoterma de desorción puede dividirse en distintas zonas, cada una de las cuales se asocia a una relación específica entre el agua y el alimento; esto es:

zona A - corresponde a la desorción de una capa monomolecular de agua y evidencia la presencia de enlaces polares.

zona B - corresponde a la desorción de capas adicionales sobre la monocapa y está relacionada con la presencia de enlaces no polares.

zona C - corresponde a la condensación de agua en los poros del material seguida por la disolución del material soluble presente. Es decir, está constituida por agua libre.

El valor de la monocapa da información, sobre la estabilidad posterior de los alimentos. Se ha observado que un alimento con un contenido de humedad correspondiente a la monocapa presenta una mayor estabilidad durante su almacenamiento. Por ejemplo, la oxidación de lípidos se incrementa notablemente cuando el contenido de agua es menor al valor de la monocapa. A contenidos de humedad superiores al valor de la monocapa se producen también, reacciones de oscurecimiento no enzimático

a mayores velocidades. Por otra parte, si el contenido de humedad llega a alcanzar la zona C, las reacciones que pueden llevarse al cabo son enzimáticas, o se pueden establecer condiciones favorables para el crecimiento de microorganismos.

3.112. Modelos matemáticos más importantes.

No hay un modelo matemático que describa todo el comportamiento de la curva, pero existen muchas teorías cuya aplicación permite predecir la desorción en algunas zonas y proporcionar información sobre el fenómeno. En este capítulo haremos un bosquejo de los modelos que emplearemos en el análisis de resultados.

En estos términos, el primer modelo que discutiremos es la isoterma de Brunauer, Emmett y Teller (1938), la cual, -- ha demostrado ser válida para valores de actividad de agua en el intervalo 0.1 a 0.5. Este modelo es una extensión del modelo de Langmuir (1918). Langmuir supuso que el calor de desorción era constante debido a que la atracción del sólido por las moléculas de agua era la misma en todos los sitios. Además, -- consideró que no había interacción entre las moléculas adsorbidas. Sin embargo, la isoterma de Langmuir solamente explicó el comportamiento hasta la monocapa (Labuza, 1968).

Brunauer-Emmett-Teller (BET) hicieron las siguientes suposiciones para ampliar el intervalo de aplicación de su modelo:

- a) el calor de desorción para la primera capa es constante e igual al ΔH_v total (calor de vaporización) mas un calor constante debido a los sitios de interacción.
- b) el calor para todas las capas sobre la monocapa es igual al ΔH_v .
- c) la adsorción o desorción solo ocurre en sitios específicos.

La ecuación general para la isoterma de BET puede ser derivada cinéticamente, de la mecánica estadística y de las condiciones termodinámicas, obteniéndose (Labuza, 1968):

$$\frac{m}{m_m} = \frac{a F}{(1-a)[1+(F-1)a]} \quad (3.1.2.)$$

rearrreglando la ecuación tenemos:

$$\frac{a}{(1-a)m} = \frac{1}{m_m F} + \frac{a(F-1)}{m_m F} \quad (3.1.3.)$$

donde:

- m = contenido de humedad,
- m_m = contenido de humedad en la monocapa,
- $F = k' \exp(Q_s/\bar{R}T)$,
- k' = coeficiente de acomodo/Factor de frecuencia $\ll 1$
- Q_s = calor de desorción en sitios específicos homogéneos,
- \bar{R} = constante de los gases.

Como se puede observar si graficamos $a/(1-a)m$ contra a obtendremos una línea recta. Un análisis de la pendiente y la ordenada en el origen de esta recta nos proporciona el valor del contenido de humedad en la monocapa (Labuza, 1968).

Otros modelos han intentado explicar el comportamiento de la isoterma en todo el intervalo de actividades de agua.

En particular los modelos de Halsey (1948) y Henderson (1952) - han demostrado ser válidos en el intervalo de 0.1 a 0.8 de actividad de agua (Iglesias et al, 1976).

La ecuación propuesta por Henderson es la siguiente:

$$(1 - a) = \exp - (J m^n) \quad (3.1.4.)$$

en la cual:

J y n son constantes del modelo.

Expresando esta ecuación en forma logarítmica para graficarla en forma de línea recta, tenemos:

$$\ln [-\ln (1-a)] = n \ln m + \ln J \quad (3.1.5.)$$

La ecuación propuesta por Halsey es la siguiente:

$$a = \exp (- b / \bar{R} T \theta^q) \quad (3.1.6.)$$

donde:

b y q son parámetros,

$$\theta = m / m_m$$

Expresada en forma logarítmica:

$$\ln (\ln 1/a) = - q \ln (m/m_m) + \ln b/\bar{R}T \quad (3.1.7.)$$

Halsey asume que la energía potencial de una molécula varía inversamente a la distancia a la superficie. También establece que el valor de q caracteriza el tipo de interacción entre el vapor y el sólido. Si q es grande, la atracción del sólido por el vapor es muy específica y no se aleja mucho de la superficie. Si q es pequeña entonces las fuerzas, que actúan, son del tipo de Van der Waals y pueden actuar a una gran distancia. Esta ecuación puede ser utilizada, usando o no el valor del con

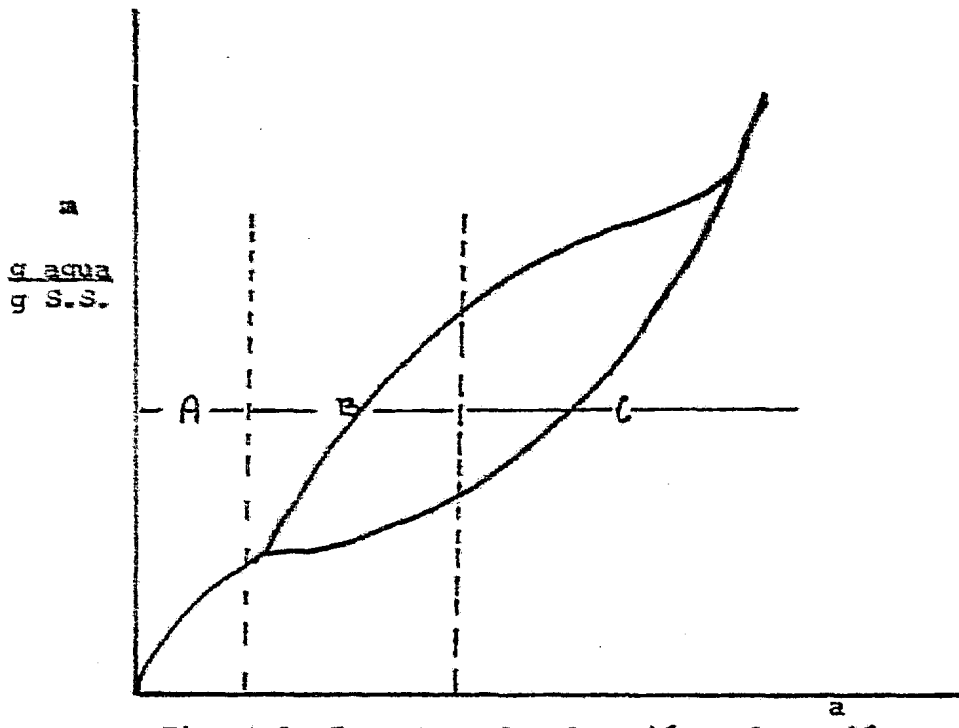


Fig. 3.1. Isothermas de adsorción y desorción.

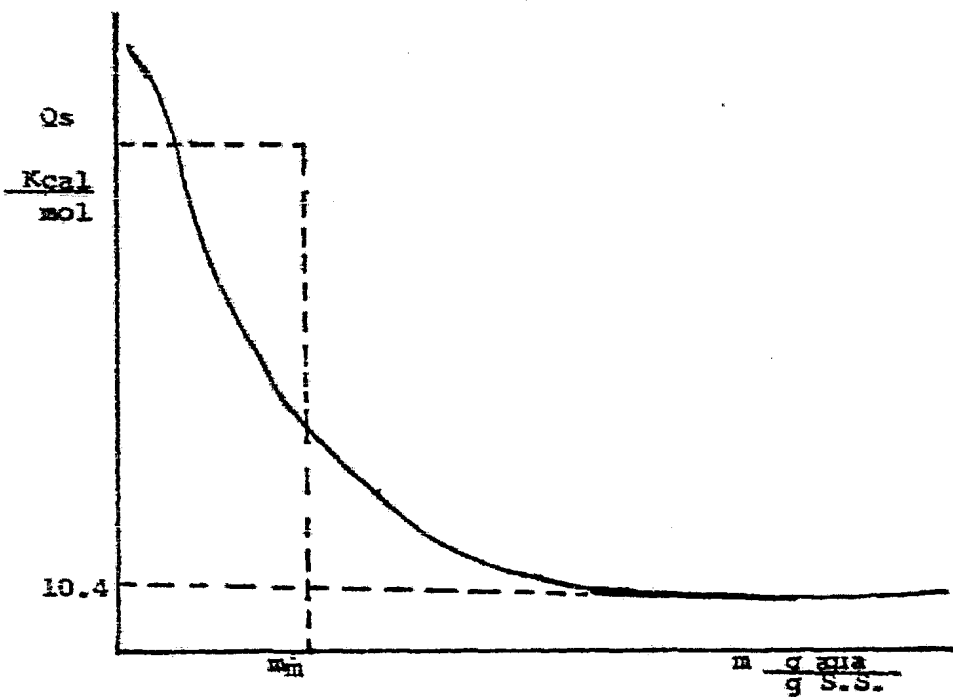


Fig. 3.2. Q_s vs. contenido de humedad

tenido de humedad en la monocapa que ha sido calculado, con anterioridad, por medio de la ecuación de BET. Si no se tiene el valor de la monocapa, θ adquiere solo el valor del contenido de humedad.

La superficie del sólido o de la monocapa puede ser determinada por medio de la siguiente igualdad (Labuza, 1968):

$$S_m = m_m(N_o)(1/M_{H_2O})(A_{H_2O}) = 3.5 \times 10^3 m_m \quad (3.1.8.)$$

donde:

$$M_{H_2O} = \text{peso molecular del agua} = 18 \text{ g/mol}$$

$$N_o = \text{no. de Avogadro} = 6.02 \times 10^{23} \text{ moléculas/g mol}$$

$$A_{H_2O} = \text{área de la molécula de agua} = 10.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$$

3.1.3. Cálculo del calor de desorción.

El fenómeno de desorción obedece la ley de Clausius-Clapeyron, la cual se traduce en la siguiente expresión:

$$\frac{d(\ln a)}{d(1/T)} = - \frac{Q_s}{R} \quad (3.1.9.)$$

Si las isotermas se realizan a diferentes temperaturas, aquellas mostraran un decremento en la cantidad desorbida relacionada con un aumento en la temperatura a una actividad de agua constante.

Como se observa en la ecuación anterior, si graficamos el logaritmo de la actividad de agua contra el recíproco de la temperatura absoluta a un contenido de humedad constante obtendremos una línea recta cuya pendiente corresponde al ca-

lor de desorción dividido entre la constante general de los gases. El comportamiento general del calor total de desorción con el contenido de humedad se indica en la figura 3.2.

En esta figura es posible observar que el calor de desorción no es constante, incrementándose a bajos contenidos de humedad. Esta conducta explica la dificultad creciente con la que se elimina agua del producto a medida que tiene lugar su deshidratación.

3.2. Separación.

3.2.1. Características del lecho fluidizado.

El fenómeno de fluidización ha sido descrito con anterioridad. En esta ocasión, discutiremos este fenómeno tomando en cuenta la relación que guarda la caída de presión del lecho con respecto a la velocidad superficial del aire. En estos términos, la resistencia que ofrece la carga al paso del fluido, en cualesquiera de los estados en que se encuentre: lecho fijo, lecho fluidizado o transporte neumático de sólidos, se traduce en una caída de presión a través del lecho.

Como se ha señalado, la fluidización tiene el siguiente mecanismo (Vizcarra, 1974): 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 lineal debi

do a la falta de movimiento de las partículas.

Si al aumentar el gasto, se presenta un aumento súbito de la caída de presión, debido a que la fuerza estática presentada por el lecho es vencida por la fuerza que ejerce el fluido, se alcanza entonces, la velocidad mínima de fluidización.

Ya en la región de fluidización, la caída de presión a través del lecho se mantiene constante, durante cierto intervalo de velocidad del fluido. Esto es, las partículas se encuentran suspendidas y ejercen una resistencia constante al paso del fluido. En este punto se puede considerar que la distribución se ha homogenizado en las distintas zonas del secador.

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

Por último, a velocidades mayores, se produce el transporte neumático. A la zona donde se aprecia este fenómeno se le denomina zona de iniciación de arrastre de sólidos y a la velocidad a la que se presenta 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 resultado de este transporte la caída de presión disminuye, en respuesta al decremento de la carga del lecho. Esta característica de la fluidización puede ser aprovechada para separar partículas de distintos tamaño o densidad. Por esta razón el transporte neumático de sólidos o arrastre de sólidos - puede ser aprovechado en la separación de partículas de diferentes densidades y/o tamaños (Vizcarra, 1974).

Una curva característica donde se gráfica la caída de presión del lecho contra la velocidad superficial del aire, para determinar la velocidad mínima de fluidización y la velocidad terminal, se muestra en la figura 3.3. La relación que explica la velocidad mínima de fluidización, para partículas esféricas pequeñas, es la siguiente (Leva, 1959):

$$v_{fm} = \frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \cdot \frac{\rho_s - \rho_a}{\mu} \cdot g \cdot \frac{\epsilon_{fm}^3}{1 - \epsilon_{fm}} \quad (3.2.1.)$$

donde:

$\phi_s = \frac{\text{superficie de una esfera}}{\text{superficie de la partícula}}$

$\phi_s = \text{esfericidad de la partícula}$

$d_p = \text{diámetro promedio de partícula}$

$\rho_s = \text{densidad del sólido}$

$\rho_a = \text{densidad del aire}$

$g = \text{aceleración de la gravedad}$

$\epsilon_{fm} = \text{fracción vacía del lecho en fluidización mínima}$

$$\epsilon_{fm} = \frac{v_t - v_p}{v_t}$$

$v_t = \text{volumen total del lecho expandido a la velocidad mínima de fluidización}$

$v_p = \text{volumen total de las partículas.}$

Esta relación nos permite observar los diferentes factores que influyen en la velocidad mínima de fluidización.

3.2.2. Velocidad de separación.

La separación de sólidos es un fenómeno complejo de analizar por las diferentes variables que afectan al mecanismo de transporte neumático. El modelo que presentamos intenta describir la velocidad de transporte en un sistema de dos componentes (Leva, 1959). El arrastre o transporte de partículas ligeras (menor tamaño, menor densidad) con respecto al tiempo puede ser explicado mediante la siguiente expresión:

$$C = C_0 \exp - k t \quad (3.2.2.)$$

En esta ecuación, C_0 es la concentración inicial de partículas de menor densidad, y k es la constante de velocidad de separación. Esta relación ha demostrado ser válida en un amplio intervalo de concentraciones de partículas ligeras a una velocidad superficial constante del aire. Por debajo de un cierto valor de C' , referida como la concentración crítica, la velocidad de separación es más pequeña que la que puede ser predicha por la ecuación (Leva, 1959).

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 obser

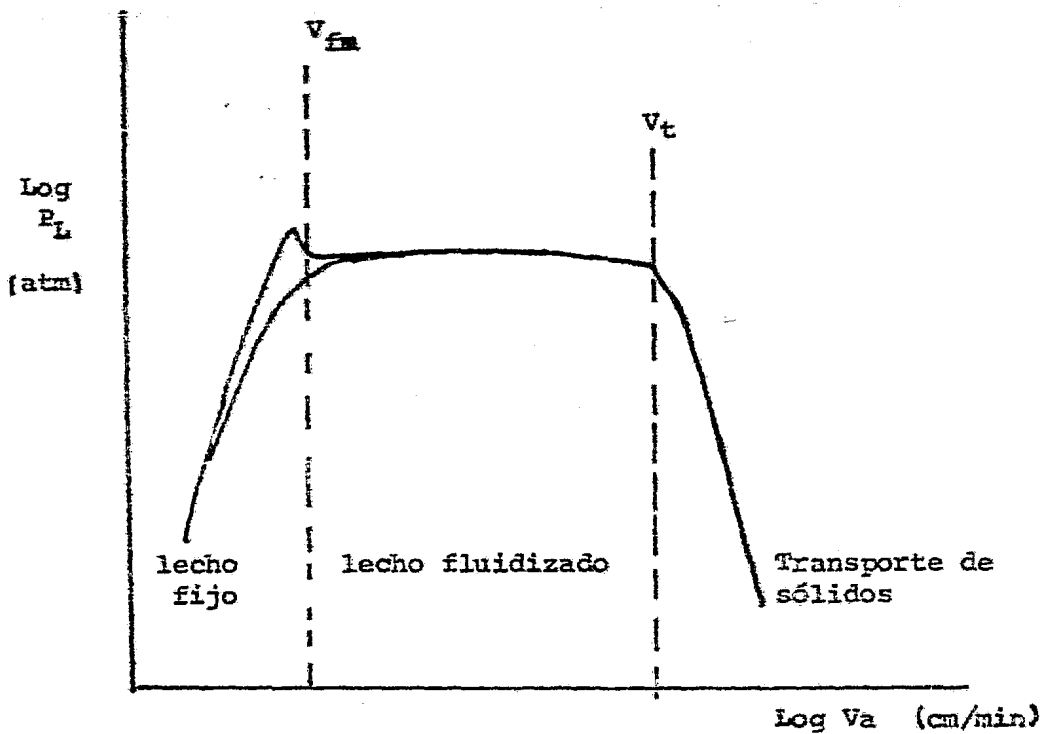


Fig. 3.3. Caída de presión real del lecho vs. velocidad superficial del aire.

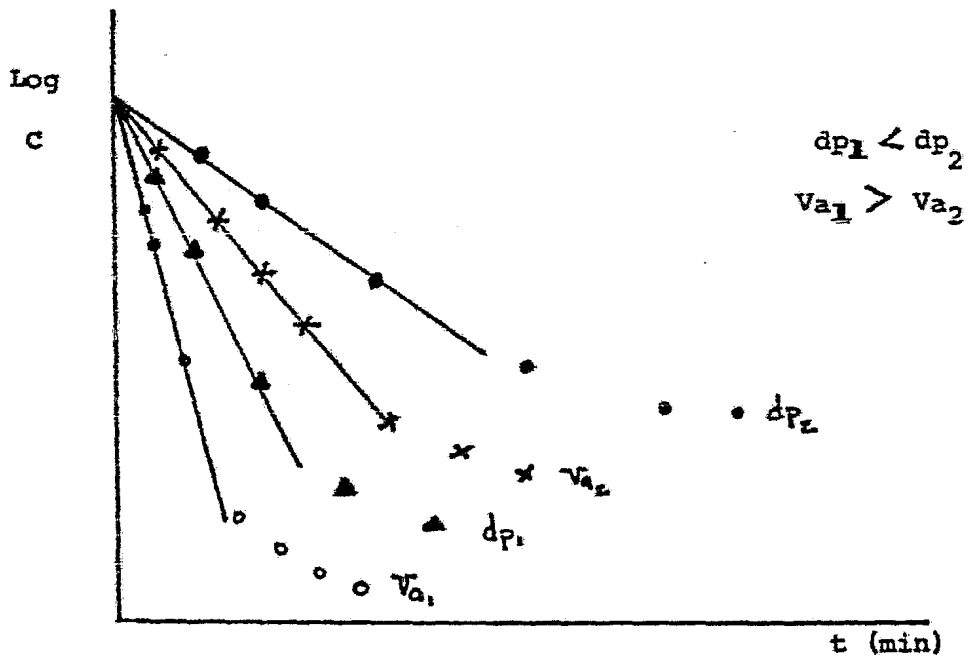


Fig.3.4. Modelo de Leva para predecir la velocidad de separación.

va que el arrastre de sólidos es más difícil debido a que, a estas alturas, el lecho está constituido únicamente por partículas más pesadas.

La separación de partículas está en función de diferentes variables: la velocidad del fluido, la velocidad terminal de los componentes ligeros, la temperatura, el tamaño del componente, la altura del lecho, la humedad inicial de las partículas y su forma. (Leva, 1959).

Mediante el modelo presentado es posible calcular - tiempos de separación de sistemas de dos componentes cuando se mantienen constantes los parámetros con que se determinó la - constante de velocidad de separación. En la figura 3.4. se presentan las gráficas de concentración de partículas ligeras en el lecho contra el tiempo a distintas concentraciones o velocidades de aire.

3.3. Teoría de secado.

3.3.1. Fundamentos.

El secado de sólidos por convección pueda definirse - como un proceso mediante el cual se remueve agua de un sólido - usando una corriente de gas, generalmente a alta temperatura y bajo contenido de humedad. Este gas cede energía térmica suficiente para provocar la eliminación de agua en el sólido.

En la deshidratación del sólido tienen lugar transfe

rencias de masa y calor tanto en el interior del material como en la interfase sólido-gas, debidas a la existencia de gradientes de temperatura y concentración de agua entre el material húmedo y el gas seco. Las velocidades de transferencia dependerán de la magnitud de estos gradientes, así como también del área de transferencia y de los coeficientes de transporte particulares de cada material (Segurajauregui, 1982).

Constituyen el proceso de secado diferentes etapas:

i) período inicial, ii) período de velocidad constante de secado y iii) período de velocidad decreciente.

El período inicial es una etapa de estabilización -- que termina cuando el sólido saturado llega a la temperatura -- de bulbo húmedo del gas. Después tanto la temperatura como la velocidad de secado permanecen constantes.

Durante la etapa de velocidad constante de secado, -- el suministro de agua del interior del material a la superficie es suficiente para mantener las condiciones de saturación. Por lo tanto la presión de vapor del agua en el alimento es igual a la presión de vapor del agua pura a la temperatura del bulbo húmedo (Segurajauregui, 1982).

En esta etapa la velocidad de secado puede ser expresada mediante las siguientes ecuaciones en términos de expresiones de transporte:

transferencia de masa,

$$\left(- \frac{dm}{dt} \right)_{\text{constante}} = A K_g (P^\circ - P_a) \quad (3.3.1.)$$

transferencia de calor,

$$\left(- \frac{dm}{dt} \right)_{\text{constante}} = A h \left(\frac{T_{bs} - T_{bh}}{\Delta R_v} \right) \quad (3.3.2.)$$

transferencia interna de humedad,

$$\left(- \frac{dm}{dt} \right)_{\text{constante}} = - D \rho_s A \frac{dm}{dx} \quad (3.3.3.)$$

donde:

K_g = coeficiente de transferencia de masa en la interfase sólido-gas,

A = área de transferencia,

P° = presión de vapor,

P_a = presión parcial de agua en el gas de secado,

h = coeficiente de transferencia de calor en la interfase sólido-gas,

T_{bs} = temperatura de bulbo seco,

T_{bh} = temperatura de bulbo húmedo,

x = distancia

D = difusividad interna del líquido.

Este período termina cuando el movimiento del líquido hacia la superficie externa del sólido no es suficientemente rápido para reemplazar al líquido que se está evaporando en la superficie. Aparecen, entonces, las primeras zonas de superficie no saturadas en el sólido con lo cual se alcanza el contenido de humedad crítico. A partir de este momento, la velocidad de secado comienza a decrecer y la temperatura del sólido aumenta y tiende a alcanzar la temperatura de bulbo seco del aire de secado.

Durante este período, el proceso que controla la velocidad de secado es la difusión del agua del seno del sólido a la superficie del mismo. Entre los posibles mecanismos que describen el fenómeno del movimiento de humedad a través de un sólido poroso podríamos citar los siguientes: (Segurajauregui, 1982)

- a) difusión del líquido debida a una diferencia de concentraciones,
- b) movimiento del líquido por fuerzas de capilaridad,
- c) difusión superficial en capas de líquido adsorbidas en las interfases del sólido,
- d) difusión de vapor de agua en los poros, causada por una diferencia de presiones parciales,
- e) flujo provocado por un encogimiento y gradientes de presión,
- f) flujo causado por una secuencia de evaporación/condensación.

De estos mecanismos el que ha descrito mejor el movimiento del agua en el interior de los alimentos sólidos es el mecanismo de difusión molecular del líquido.

3.3.2. Modelo de difusión molecular del líquido.

Matemáticamente, este fenómeno, para una geometría esférica, se puede interpretar en términos del contenido de humedad, mediante la ley de Fick de la siguiente forma:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial m}{\partial r} \right] \quad (3.3.4.)$$

donde:

D = coeficiente de difusión interna,

r = distancia radial del centro a la superficie de la partícula.

Realizando un cambio de variable, definida como:

$$U = r (m - m_e)$$

podemos simplificar la ecuación (3.3.4.) a :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \quad (3.3.5.)$$

Sherwood (1929) resolvió esta ecuación, para el caso en que la resistencia a la transferencia de masa externa es despreciable, suponiendo:

1. El coeficiente de difusión molecular es constante.
2. La distribución de humedad inicial es uniforme.
3. La resistencia a la eliminación de humedad en la interfase sólido-gas es despreciable en comparación con la resistencia a la difusión interna.
4. El material no se encoge. (Segurajauregui, 1982).

De la segunda suposición se desprende que la humedad en la superficie del sólido está en equilibrio con el medio de secado una vez iniciada la operación. Bajo estas condiciones, el conjunto de condiciones en la frontera estará dado por:

a) el contenido de humedad inicial es homogéneo:

$$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = 1 \quad \text{cuando } m = m_0 \quad \text{a } t = 0, r > 0$$

b) el contenido de humedad final es homogéneo e igual al contenido de humedad de equilibrio:

$$U = (m - m_e)r = 0 \quad \text{a} \quad t = \infty, \quad r > 0$$

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

$$\frac{\partial m}{\partial r} = 0 \quad \text{a} \quad r = 0 \quad (\text{centro de la partícula}), \quad t > 0$$

d) el contenido de humedad en la superficie se encuentra en equilibrio con el aire de secado inmediatamente después de iniciada la operación:

$$U = 0 \quad \text{a} \quad t > 0, \quad r = R$$

En base a estas condiciones la solución a la ecuación de Fick está dada por:

$$m^* = \frac{m - m_e}{m_0 - m_e}$$

$$m^* = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp - (n\pi^2) \frac{Dt}{R^2} \quad (3.3.6.)$$

Esta ecuación puede simplificarse para valores de m^* menores o iguales a 0.6, reduciéndose la expresión al primer término de la serie, quedando:

$$\text{Si } m^* \leq 0.6 \quad m^* = \frac{6}{\pi^2} \exp - \pi^2 \frac{Dt}{R^2} \quad (3.3.6.)'$$

Por otra parte cuando la resistencia a la transferencia externa no es despreciable; esto es, cuando el contenido de humedad en la superficie no está en equilibrio con el medio de secado, las condiciones en la frontera están dadas por:

a) el contenido de humedad inicial de la muestra es homogéneo:

$$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = 1 \quad \text{cuando } m = m_0 \quad \text{a} \quad t = 0, \quad r > 0$$

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

$$U = (m - m_e)r = 0 \quad \text{a} \quad t = \infty, r > 0$$

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

$$\frac{\partial m}{\partial r} = 0 \quad \text{a} \quad r = 0, t > 0$$

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

$$-D \frac{\partial m}{\partial r} = K' (m - m_e) \quad \text{a} \quad r = R, t > 0$$

La ecuación de Fick puede ser resuelta por separación de variables:

$$U = Y(r) X(t) \quad (3.3.7.)$$

Donde Y es tan solo función de la distancia y X es función tan solo del tiempo.

Reemplazando la ecuación (3.3.7.) en la ecuación (3.3.5.) tenemos que:

$$Y \frac{\partial X}{\partial t} = D X \frac{\partial^2 Y}{\partial r^2}$$

o bien:

$$\frac{1}{D X} \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial r^2} \quad (3.3.8.)$$

Analizando esta ecuación observamos que las variables, r y t, pueden variar independientemente una de otra; es decir, pueden analizarse diferentes valores de r a un mismo tiempo. Así

ra bien, bajo estas condiciones puede escribirse la ecuación --
(3.3.8.) debido a que dicha igualdad es constante. Por lo tanto:

$$\frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial r^2} = \frac{1}{D X} \frac{\partial X}{\partial t} = -\beta^2 \quad (3.3.9.)$$

donde: $-\beta^2 = \text{constante.}$

Esta igualdad plantea 2 tipos de ecuación:

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \beta^2 D X = 0 \quad (3.3.10.)'$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial r^2} + \beta^2 Y = 0 \quad (3.3.11.)'$$

Integrando estas ecuaciones, las soluciones están dadas por:

$$X = \exp -\beta^2 D t \quad (3.3.10.)$$

$$Y = A \cdot \text{sen } \beta r + B \cos \beta r \quad (3.3.11.)$$

Sustituyendo estos últimos valores en la ecuación ---
(3.3.7.), tenemos:

$$U = (\exp -\beta^2 D t) (A \text{ sen } \beta r + B \cos \beta r) \quad (3.3.12.)$$

Esta ecuación deberá ser válida para las condiciones en la frontera, definidas con anterioridad:

- la expresión (3.3.12.) cumple la segunda condición en la frontera sin sufrir ninguna alteración.
- la tercera condición en la frontera, requiere que $B = 0$, por lo que:

$$U = (A \text{ sen } \beta r) \exp -\beta^2 D t \quad (3.3.13.)$$

- la cuarta condición da pie a la expresión:

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{ sen } \beta_n r \exp (-\beta_n^2 D t) \quad (3.3.14.)$$

donde los valores de β_n son las raíces positivas del número de Biot (L) de transferencia de masa. Los valores de estas raíces, para distintos valores de L , están tabulados en el apéndice 1.1.1.

$$\beta_n \cot \beta_n - 1 + L = 0 \quad (3.3.15.)$$

y el número de Biot está definido como:

$$L = \frac{K'}{D} R \quad (3.3.16.)$$

- finalmente la primera condición requiere que:

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \operatorname{sen} \beta_n r \quad (3.3.17.)$$

ya que:

$$\exp - \beta_n^2 D t = e^0 = 1$$

lo cual indica que la constante A_n debe ser escogida de tal forma que m^* sea representada por una serie infinita de términos - en el intervalo $0 < r < R$. Resultando el valor de A_n :

$$A_n = (m_0 - m_e) \frac{-R/\beta_n \cos \beta_n R + 1/\beta_n^2 \operatorname{sen} \beta_n R}{\frac{1}{2} \beta_n (\beta_n R - \operatorname{sen} \beta_n R \cos \beta_n R)} \quad (3.3.18.)$$

sustituyendo la expresión anterior en la ecuación (3.3.14.) da:

$$U = (m_0 - m_e) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-R/\beta_n \cos \beta_n R + 1/\beta_n^2 \operatorname{sen} \beta_n R}{\frac{1}{2} \beta_n (\beta_n R - \operatorname{sen} \beta_n R \cos \beta_n R)} \operatorname{sen} \beta_n r e^{-\beta_n^2 D t}$$

rearrreglando esta última expresión resulta:

$$m^* = \frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{2LR}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\beta_n^2 D t} \operatorname{sen} \beta_n r/R}{\beta_n^2 + L(L-1) \operatorname{sen} \beta_n} \quad (3.3.19.)$$

la cantidad promedio de humedad de la partícula está dada por:

$$\bar{m} = \int_0^R \frac{4\pi r^2 m}{4/3 \pi r^3} dr \quad (3.3.20.)$$

sustituyendo la ecuación (3.3.19.) en la ecuación (3.3.20.)

y efectuando la integración se tiene:

$$\bar{m} = m_e + 6(m_0 - m_e) \frac{L}{R^2} \int_0^R \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r \operatorname{sen} \beta nr/R e^{-\beta n^2 Dt/R^2}}{\operatorname{sen} \beta n[\beta n^2 + L(L-1)]}$$

resolviendo la integración y sustituyendo su valor para \bar{m} , resulta:

$$m^* = \frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6r^2 \exp - \beta n^2 Dt/R^2}{\beta n^2 [\beta n^2 + L(L-1)]} \quad (3.3.21.)$$

Así llegamos a la ecuación deseada, donde la difusión del líquido resulta en función de los dos parámetros D y K' , coeficientes de transferencia de masa interno y externo respectivamente.

**IV. MATERIALES Y METODOS
EXPERIMENTALES.**

4.1. Determinaciones previas.

4.1.1. Origen de la materia prima.

La materia prima que se utilizó para realizar este estudio, se compró en el mercado de la Merced y constó de 28 Kg de uva roja de mesa.

4.1.2. Obtención y conservación del orujo de uva.

Para la obtención del orujo sin fermentar, fue necesario prensar manualmente las uvas. Estas fueron lavadas con una solución acuosa con 200 ppm de $K_2S_2O_8$ con acción bacteriostática. El orujo obtenido fue empaquetado en bolsas de medio kilogramo y congelado, para evitar su deterioro microbiológico. Los paquetes resultantes fueron descongelados oportuna y previamente a su utilización en este estudio.

4.1.3. Lavado del orujo.

Al orujo de uva se le dio un lavado previo para evitar la pegajosidad. El tratamiento seguido es una modificación al reportado por Amerine (1960): al orujo, se le agrega 3 veces su peso de una solución de HCl al 1 %, y se le deja reposar durante 5 horas. Pasadas las 5 horas se le drena. Una vez drenado, se le vuelve a agregar 2 volúmenes de una solución de HCl al 0.6 %. Reposo 12 horas y se le drena exhaustivamente. El orujo lavado de esta forma, fue utilizado tanto para el estudio de la separación por fluidización y del secado de la semilla como para el estudio de las isoterms de desorción.

4.1.4. Determinación de sólidos solubles en el agua de lavado.

La cantidad de sólidos solubles se determinó por refractometría (A.O.A.C. 31.011., 1970) en un refractómetro de campo marca Binko No. 9025 con escala 0 a 32 % de sólidos solubles.

4.1.5. Determinación de antocianinas en el agua de lavado.

Las antocianinas fueron determinadas por absorbancia a 535 nm, como reporta Metevier (1980), usando un espectrofotómetro SP 30 U.V. PYE UNICAM, tomando como blanco agua destilada. Para determinar la cantidad de antocianinas extraídas, Metevier usa como coeficiente de extinción (ϵ) y como peso molecular promedio (PM), respectivamente: 28 000 l/g mol y 529 - g/g mol. Con lo cual el cálculo es el siguiente:

$$\text{Conc. antocianinas extraídas} = \frac{(\text{abs.})(\text{PM})(\text{vol. agua residual})(\text{Dil.})}{(\epsilon)(\text{peso muestra})}$$

4.1.6. Determinación de la densidad aparente del hollejo y de la semilla de uva.

La densidad aparente fue determinada siguiendo el método que se describe a continuación. La muestra necesaria para aforar probetas de 50 y 10 ml, se pesó por diferencia. Ya aforadas, con hollejo o con semilla según fuere el caso, las probetas fueron llevadas a volumen con agua o nujol. El volumen necesario, para el segundo aforo, fue medido con buretas de 25 ml. Para el cálculo de la densidad se restó al volumen total de aforo, el volumen vertido de la bureta obteniéndose así el volu-

men aparente de la muestra y a partir de este último valor se puede estimar su densidad aparente.

4.2. Determinación de isotermas de desorción de semillas de uva.

4.2.11 Descripción del equipo empleado.

Para determinar las isotermas se necesita controlar con precisión la temperatura de la estufa, para lo cual fue necesario adaptar un termostato Saginohiva Modelo 110 que da una precisión de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ y un reóstato para evitar cambios bruscos de voltaje. La confirmación de que se está trabajando a la temperatura adecuada y marcada por el termostato se obtuvo construyendo una curva de calibración de temperatura real contra temperatura en el termostato. Para este efecto se determinó la distribución de temperaturas en distintos sitios de la estufa, mediante una serie de termopares con registrador digital Cole Parmer. Esta curva se presenta en la figura 2.1.1. en el apéndice. En un recuadro se precisan las zonas que fueron utilizadas para la determinación de las isotermas.

Para esta determinación, se construyeron cámaras o celdas de humedad constante con frascos de vidrio de 250 cc. de capacidad a los cuales se les hizo una oradación en la tapa, para colocar un tapón de hule no. 00. De este tapón colgaba un plato de aluminio sujeto con alambre de cobre, como se muestra en la figura 4.1.:

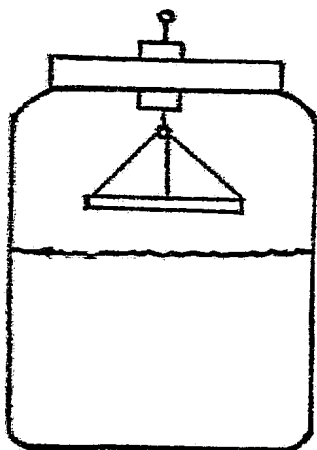


Fig. 4.1. Celda de humedad constante.

Este modelo de celda fue sugerido por el Ing. Ramón Arana (comunicación personal) y es una extensión a la celda propuesta en la literatura (Lang et al, 1981). En estas celdas se vertieron soluciones saturadas de distintas sales procurando dejar el mínimo espacio libre entre el plato de aluminio y el nivel de la solución, con objeto de alcanzar rápidamente el equilibrio. Estas soluciones saturadas proporcionan humedades relativas específicas a diferentes temperaturas, como se muestra en el cuadro 4.2.

4.2.2. Medición del contenido de humedad de la semilla de uva en equilibrio con la humedad relativa para la determinación de isoterms.

La muestra húmeda (semilla de uva) fue pesada y colocada dentro de cada una de las celdas de humedad relativa cono-

Cuadro 4.2. % de humedad relativa de soluciones saturadas de sales
a diferentes temperaturas (Brooker et al, 1974).

Temperatura (°C)	LiCl	MgCl ₂ 6H ₂ O	Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	NaCl	(NH ₄) ₂ SO ₄	KNO ₃	K ₂ SO ₄
10	13.3	34.2	57.8	75.4	81.8	95.5	97.9
32	11.9	32.6	51.9	75.6	80.0	90.0	96.5
49	11.5	31.6	47.3	74.8	79.1	85.3	95.8
68	11.1	30.3	42.2	73.2	78.0	78.0	95.0

cida a una temperatura constante. Se dejaron unos días en reposo y la pérdida de peso era medida hasta llegar al equilibrio. El criterio que se siguió para determinar las condiciones de equilibrio fue tener un peso constante en las 3 primeras cifras decimales durante dos días consecutivos. Las muestras se pesaron en una balanza analítica Sartorius con capacidad de 200 g modelo 2434.

Al llegar al equilibrio se determinó el contenido de humedad de las muestras siguiendo el método de estufa al vacío descrito en la bibliografía (A.O.A.C. 14.003., 1970), los resultados fueron reportados en base seca.

Con los datos de humedad relativa y contenido de humedad a temperatura constante se graficaron las isoterms de desorción. Las determinaciones se hicieron por triplicado a tres distintas temperaturas.

4.3. Determinaciones en el secador de lecho fluidizado.

4.3.1. Descripción del equipo.

El equipo se esquematiza en el diagrama 4.3. y se describe a continuación. Consta de una compresora (A) Kellogg Mexicana con motor compacto General Electric que alimenta el aire a un tanque donde se almacena y mantiene el gas dentro de un intervalo de presiones de 6 a 9 Kg/cm². Del tanque, el aire pasa a una trampa (B) inmersa en un baño de hielo donde se condensa

- A : COMPRESOR
- B : trampa
- C : regulador de presión
- D : columnas de silica gel
- E : rotámetro
- F : resistencia
- G : secador
- H : reducción
- I : ciclón
- J : manómetro

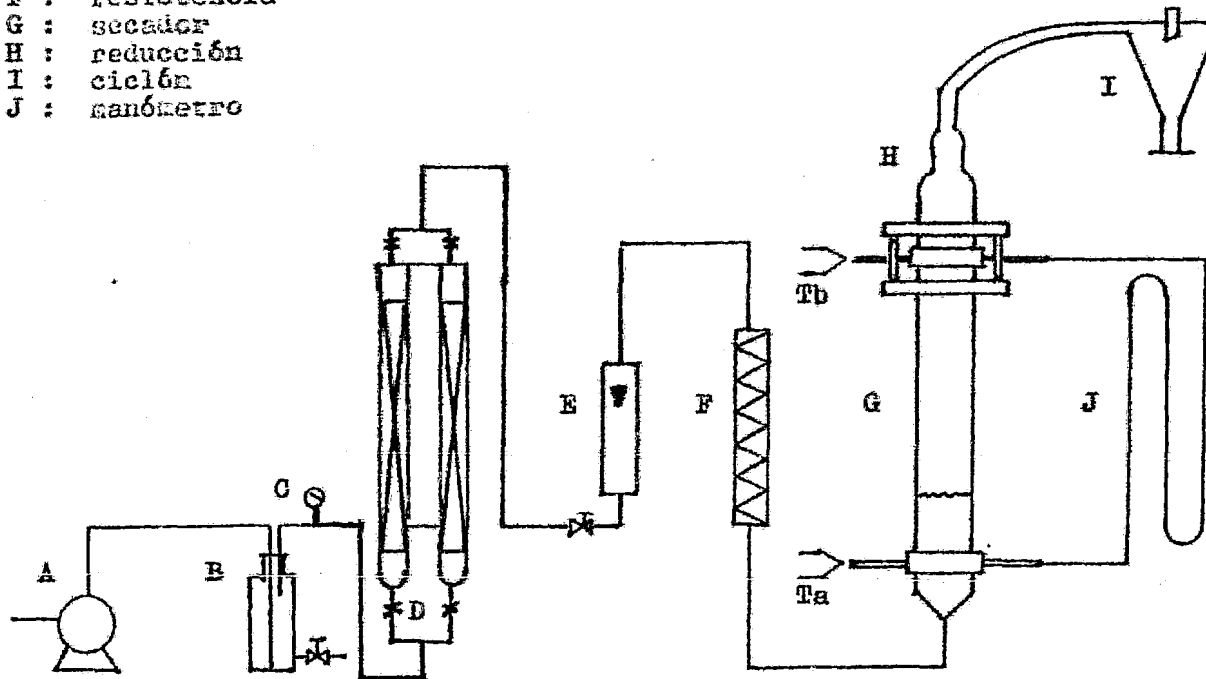


Fig. 4.3. Diagrama de flujo.

parte del contenido de humedad del aire de secado.

Después de la trampa, la presión es controlada mediante una válvula (C) reguladora de presión Sycmatic donde se mantiene la presión del sistema de 4.5 a 5 Kg/cm². De ahí, el aire es alimentado a una columna empacada (D) de sílica gel con indicador de humedad con el fin de disminuir aún más la humedad relativa del aire. Se contaba con columnas alternas, para tener una operación continua. El aire seco pasa a través de un rotámetro (E) FP-1/2-27-g-10/83 Fisher Porter con escala de medición de 0 a 20 m³/hr a 5 Kg/cm² y a 20°C.

Una vez seleccionado el flujo volumétrico de trabajo, el aire es calentado por medio de una resistencia flexible tipo Briskeat embobinada alrededor de un tubo (F) regulada por un -- reóstato, con el fin de alcanzar la temperatura de operación.

El aire de baja humedad a la temperatura de trabajo, entra al secador como se señala en el esquema. El secador (G) -- está constituido por una columna de vidrio con diámetro interno de 2.9 cm y una longitud de 48 cm. En la parte inferior del secador se encuentra el plato distribuidor: una placa de acero -- con perforaciones de 0.5 mm de diámetro interno, las 29 perforaciones tienen un arreglo cuadrado con una separación de 0.5 cm. Debajo del plato distribuidor se colocó una malla de acero inoxidable 325 para evitar que pequeñas partículas cayeran a la base del secador. Tanto en la parte inferior como en la parte su-

perior, el secador está unido a tramos de tubería con oradaciones en donde se pueden a su vez conectar las mangueras de los manómetros. En la parte superior se tiene una reducción (H) y un juego de bridas que permiten cargar el equipo.

La reducción está conectada a través de un tramo de tubería de plástico transparente a la entrada tangencial de un ciclón (I) construido con un matraz Erlen Meyer de 500 ml al cual además se le han acondicionado baffles. Este ciclón tiene a la salida una bolsa de tela que sirve para recolectar los sólidos arrastrados. El secador se encuentra aislado con poliuretano para evitar pérdidas de calor.

Para medir las condiciones de temperatura de entrada y de salida del aire, se utilizó un sistema de termopares Cole Farmer. Para efectuar las lecturas de bulbo húmedo, el aire se pasaba a través de un termopozo donde el termómetro se encontraba cubierto por una gasa húmeda. Dos manómetros fueron utilizados uno de agua (J) y otro de mercurio, este último necesario para cuando la presión era demasiado grande. Además para evitar fugas todo el equipo fue sellado con silicón Sista Henkel.

4.3.2. Arranque del equipo.

- 1.- Purgar la compresora y la línea de aire hasta que por está no saliera agua.
- 2.- Encender la compresora, dejando puesto el mecanismo automático de regulación de presión (de 6 a 9 Kg/cm²).

- 3.- Poner hielo en el baño de la trampa.
- 4.- Verificar que la sílica empacada este totalmente seca, checar si no hay fugas y que el secador este perfectamente vertical.
- 5.- Abrir la llave de la línea de aire, fijar la presión de entrada a 5 Kg/cm^2 mediante la válvula y la temperatura por medio del reóstato.
- 6.- Regular el flujo volumétrico de entrada con el rotámetro.
- 7.- Leer la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo (mojando previamente la gasa del bulbo).

4.3.3. Determinaciones de velocidades mínimas de fluidización.

Para hacer estas determinaciones se partió de una muestra de orujo lavado. El hollejo y la semilla fueron separados para analizar individualmente las velocidades mínimas de fluidización de cada uno de los componentes. Estas se determinaron tanto para los componentes húmedos como para los componentes secos.

El equipo se cargó con semillas hasta lograr una altura igual al diámetro del secador. En el caso del hollejo se estableció una altura dos veces igual a la longitud del diámetro. Una vez cargado el secador, con la válvula del rotámetro cerrada inicialmente, se hizo pasar una corriente de aire aumentando progresivamente su gasto. A cada lectura del rotámetro, se midió la caída de presión correspondiente mediante la diferencia

de alturas en las ramas del manómetro adecuado al caso.

Esta lectura de caída de presión real fue corregida - por la caída de presión debida al plato distribuidor. Esta última caída de presión fue 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 real del lecho:

$$\Delta P_t = \Delta P_L + \Delta P_d$$

donde:

ΔP_t = caída de presión total

ΔP_L = caída de presión real del lecho

ΔP_d = caída de presión del plato distribuidor.

Una vez alcanzado el gasto máximo posible, la experiencia fue repetida 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.

También se midió la altura promedio que alcanzó el - lecho en su proceso de expansión. Se llevaron al cabo mediante mediciones por quintuplicado para poder evaluar todas estas de terminaciones.

4.3.4. Separación del hollejo de uva.

La velocidad de separación fue estudiada en función de tres variables: temperatura, velocidad del fluido y relación de la altura de lecho entre el diámetro del secador (L/D). En

estos términos las corridas realizadas fueron las siguientes, - por duplicado:

- a) efecto de la velocidad superficial del aire: $L/D = 2$, T de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y V_a de : 20 185, 25 235, 30 280, 35 325 y 40 370 cm/min.
- b) efecto de la temperatura: $L/D = 2$, $V_a = 30\ 280$ cm/min y -- temperaturas: $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- c) efecto de la relación L/D : $V_a = 30\ 280$ cm/min, $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y L/D de: 1, 2, 3 y 4.

Una vez arrancado el equipo la operación consiste:

- 1.- Cerrar la válvula del rotámetro cuando ya se ha alcanzado la temperatura de trabajo.
- 2.- Cargar el secador con la muestra necesaria de orujo para - cada nivel de L/D estudiado.
- 3.- Cerrar la brida superior para evitar fugas y colocar una - bolsa de tela a la salida del ciclón para recoger la muestra.
- 4.- Accionar el cronómetro al mismo tiempo que se abre la válvula del rotámetro hasta el nivel de la velocidad del flujo seleccionado para cada corrida.
- 5.- Recoger la muestra arrastrada hasta el ciclón cada 5 minutos hasta que la totalidad o casi la totalidad del hollejo se arrastró.

A cada muestra recogida en el ciclón se le determinó

estos términos las corridas realizadas fueron las siguientes, - por duplicado:

- a) efecto de la velocidad superficial del aire: $L/D = 2$, T de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y V_a de : 20 185, 25 235, 30 280, 35 325 y 40 370 cm/min.
- b) efecto de la temperatura: $L/D = 2$, $V_a = 30\ 280$ cm/min y -- temperaturas: $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- c) efecto de la relación L/D : $V_a = 30\ 280$ cm/min, $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y L/D de: 1, 2, 3 y 4.

Una vez arrancado el equipo la operación consiste:

- 1.- Cerrar la válvula del rotámetro cuando ya se ha alcanzado la temperatura de trabajo.
- 2.- Cargar el secador con la muestra necesaria de orujo para - cada nivel de L/D estudiado.
- 3.- Cerrar la brida superior para evitar fugas y colocar una - bolsa de tela a la salida del ciclón para recoger la muestra.
- 4.- Accionar el cronómetro al mismo tiempo que se abre la válvula del rotámetro hasta el nivel de la velocidad del fluido seleccionado para cada corrida.
- 5.- Recoger la muestra arrastrada hasta el ciclón cada 5 minutos hasta que la totalidad o casi la totalidad del hollejo se arrastró.

A cada muestra recogida en el ciclón se le determinó

su contenido de humedad en la forma antes descrita (sección -- 4.3.2.).

4.3.5. Deshidratación de semillas de uva.

Para el estudio de la velocidad de secado se variaron tres parámetros: temperatura, velocidad del fluido y relación - altura del lecho fijo/diámetro del secador, L/D. Las experien-- cias llevadas al cabo, por triplicado, fueron las siguientes:

- a) efecto de la velocidad superficial del aire: $T = 25^{\circ}\text{C}$, --
L/D = 1, V_a de 20 185, 30 280, 35 325 y 45 420 cm/min.
- b) efecto de la temperatura: L/D = 1, $V_a = 30\ 280$ cm/min y tem-- peraturas de 25° , 40° , 50° , y 60°C .
- c) efecto de la relación L/D: $T = 25^{\circ}\text{C}$, $V_a = 30\ 280$ cm/min y --
L/D de 0.5, 1.5 y 2.

Las corridas fueron desarrolladas mediante los si--- guientes pasos:

- 1.- Arranque del equipo, fijando la temperatura de operación - según fuere el caso.
- 2.- Cerrar la válvula del rotámetro.
- 3.- Introducir la muestra y un termopar al secador.
- 4.- Accionar el cronómetro y seleccionar la velocidad superfi-- cial del aire de trabajo.
- 5.- Leer temperatura de bulbo seco de entrada y temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo a la salida.
- 6.- Determinar el contenido de humedad de las muestras.

4.3.6. Eficiencia térmica del secador.

a) Efecto de entrada.

Para observar como afecta la presencia del plato distribuidor en la transferencia de calor en el secador, se midió tanto la temperatura de entrada y de salida del secador como la temperatura que había inmediatamente arriba del plato distribuidor. Las condiciones de trabajo estudiadas fueron: L/D de 1, $T = 60^{\circ}\text{C}$ y V_a de 20 185, 30 280 y 40 375 cm/min.

La eficiencia fue determinada mediante la siguiente expresión (Heertjes et al, 1953):

$$e = \frac{\text{caída de temperatura en el plato}}{\text{caída de temperatura en el equipo}}$$

$$e = \text{efecto} = \frac{T_a - T_p}{T_a - T_b}$$

donde:

T_a = temperatura de entrada del secador.

T_b = temperatura de salida del secador.

T_p = temperatura arriba del plato distribuidor.

b) Temperatura en el lecho.

Para determinar la temperatura en el lecho y su diferencia con la temperatura a la salida del equipo, se hicieron determinaciones a 60°C , $L/D = 1$ y $V_a = 30\ 280$ cm/min. Además fueron medidas las temperaturas a la entrada y a la salida del secador. La medición de la temperatura en el lecho se efectuó deteniendo el paso del aire cada 10 minutos e introduciendo el termopar y la operación se reiniciaba. El efecto se calcula mediante la siguiente relación:

$$e = \frac{T_a - T_l}{T_a - T_b}$$

T_l = temperatura del lecho.

c) temperatura del aire en el lecho.

En este caso también se midió la temperatura a la entrada y a la salida del secador y a 4 distintas posiciones en el lecho. Las condiciones de estudio fueron: $L/D = 1$, $T = 60^\circ\text{C}$ y $V_a = 30\ 280\ \text{cm/min}$. El efecto para cada una de las alturas -- del lecho, se calcula así:

$$e_i = \frac{T_a - T_i}{T_a - T_b}$$

e_i = efecto a cada posición.

T_i = temperatura a cada posición.

V. PRESENTACION Y DISCU
SION DE RESULTADOS.

5.1. Tratamientos previos al orujo.

5.1.1. Lavado de orujo de uva.

El orujo de uva presenta una fuerte tendencia a la pegajosidad a causa de su alto contenido residual de carbohidratos, lo cual dificulta la separación de la semilla del hollejo. Para evitar este problema las muestras fueron tratadas con una solución ácida. Es oportuno señalar a este respecto que este lavado ácido facilita la extracción de antocianinas o ácido tartárico. En otras palabras, la introducción de este tratamiento, no es ajeno, en forma alguna, al aprovechamiento integral del orujo.

En este trabajo, encontramos que el lavado que evita la pegajosidad, es semejante al usado en la obtención de ácido tartárico (Amerine, 1960) o de antocianinas (Metevier, 1980). Cabe mencionar que, es factible usar otros tratamientos de lavado, siempre y cuando eviten la pegajosidad y permitan una buena fluidización y consecuentemente una buena separación (Baxerres, 1982) entre el hollejo y la semilla.

En la selección del tratamiento de lavado, se estudiaron diferentes condiciones de trabajo:

1.- Lavado con agua. Características: 6 volúmenes de agua por una de orujo, con o sin agitación, temperaturas de 30°, 50°, 75° y 95°C. Este tratamiento no evitó la pegajosidad, incluso en las condiciones más drásticas (agua en ebullición), percio-

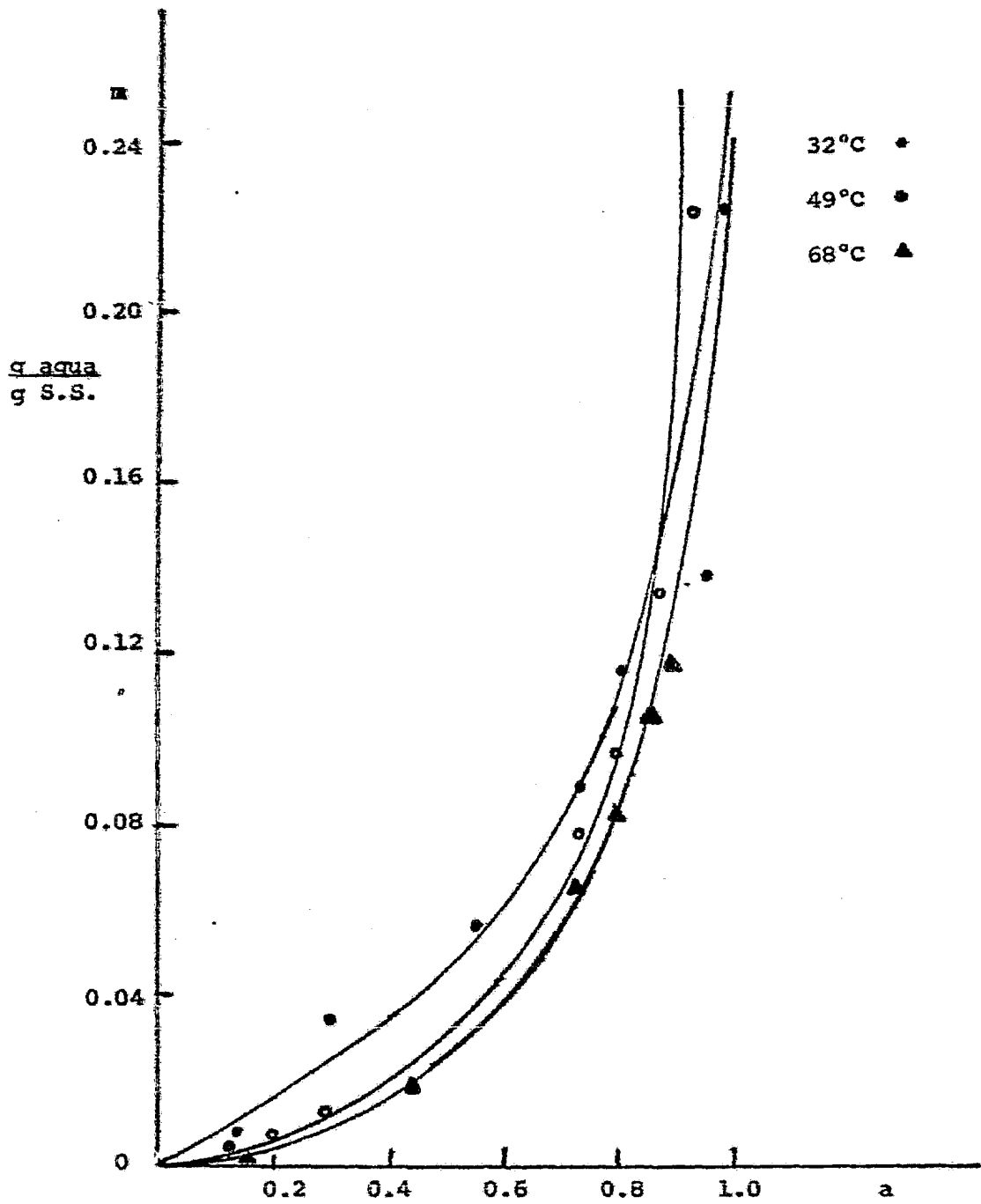


Fig. 5.1. Isothermas de desorción para semilla de uva.

tió la tendencia del producto a aglutinarse.

2.- Lavado ácido con diferentes concentraciones de HCl. Fueron estudiadas: 0.5, 1 y 5 % en dos etapas de lavado y seleccionadas las siguientes: solución al 1 % para el primer lavado y solución al 0.5 % para el segundo. Cuando se usaron concentraciones menores persistía la pegajosidad; y si el orujo era tratado con altas concentraciones, el ataque ácido era tan fuerte que provocaba aglomeración en el producto debido a la degradación de la materia orgánica.

Por otra parte, el contenido de sólidos solubles y de antocianinas promedio en el agua de lavado fue de: 2.25 % y 134.5 mg/100 g de orujo, respectivamente.

Cabe señalar que el contenido de ácido residual en el hollejo permitiría el uso de este como mejorador de suelos por su potencial en cuanto serviría a la disolución de los minerales presentes en el suelo, ofreciendo una mayor disponibilidad de los mismos a las plantas.

5.2. Isotermas de desorción.

5.2.1. Modelamiento matemático.

A partir de los datos obtenidos en las celdas de humedad constante construimos isotermas de desorción de semilla de uva a tres distintas temperaturas: 32°, 49° y 68°C. Estas isotermas se muestran en la figura 5.1. y los datos experimentales que permiten su construcción se enlistan en el apéndice 3.1.1. -

Para ajustar los datos, trabajamos con los modelos de Halsey y Henderson, siendo este último el que mejor explica el comportamiento de la isoterma en todo el intervalo de humedades relativas bajo estudio.

Comparamos las isotermas de desorción experimentales con la isoterma de adsorción reportada por Bernardini (1971) a 20°C. El orden de magnitud de las isotermas experimentales se asemeja a los valores reportados en la literatura. Como mencionamos con anterioridad, estas isotermas permiten estimar el contenido de humedad en equilibrio con las condiciones del aire de secado y fueron empleadas para el modelamiento de los perfiles de deshidratación.

5.2.2. Contenido de humedad y de la superficie de la monocapa.

Para la determinación del contenido de humedad en la capa monomolecular empleamos el modelo de BET, como se sugiere en la literatura (Labuza, 1968). La figura 5.2. muestra la recta, calculada utilizando este modelo, para actividades de agua de 0.2 a 0.5. Como ya se ha descrito, a partir de la ordenada en el origen y de la pendiente de esta recta se puede estimar el contenido de humedad de la monocapa. La isoterma utilizada para este efecto fue la de 32°C. El resultado de la monocapa fue de 0.0334 g agua/g sólido seco, valor cercano al calculado a partir de la isoterma de adsorción de 20°C, reportada, de 0.0257 g agua/g sólido seco.

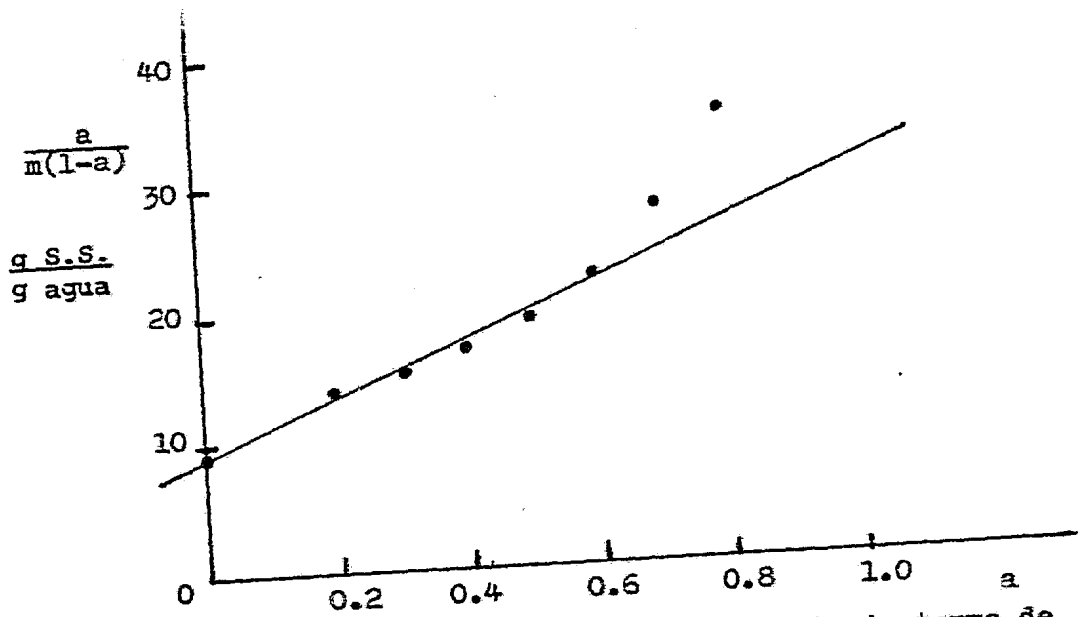


Fig. 5.2. Modelo de BET aplicado a la isoterma de desorción de 32°C (monocapa).

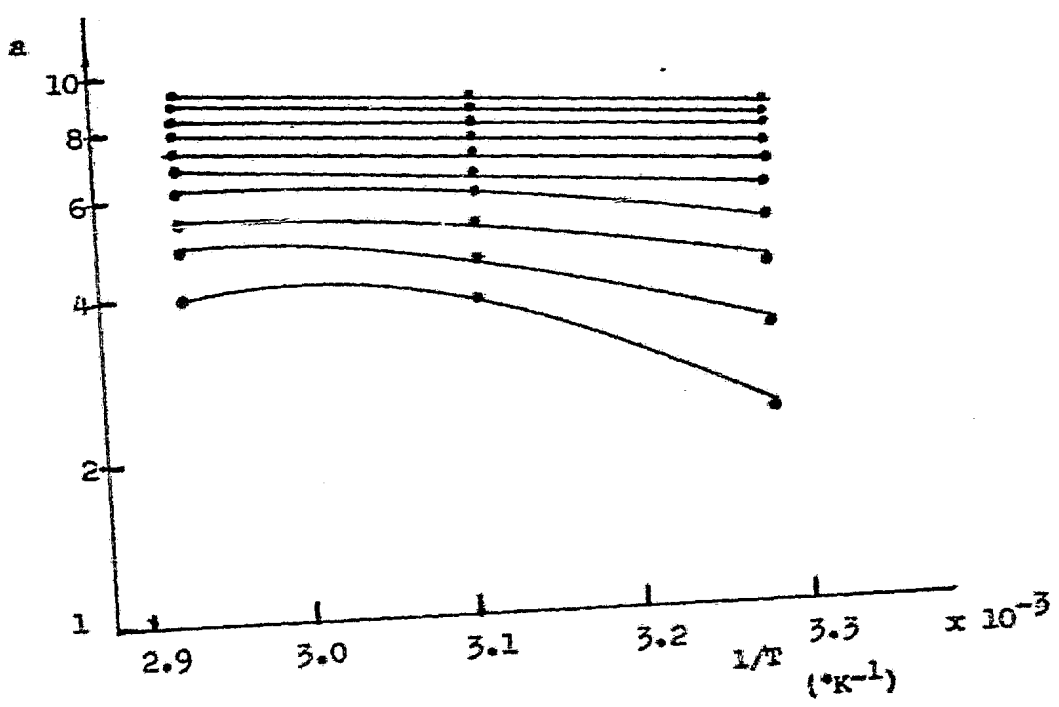


Fig. 5.3. $\ln a$ vs. $1/T$ (Cálculo de calor de desorción a distintos contenidos de humedad)

Partiendo de la estimación del contenido de humedad en la monocapa, calculamos el valor de la superficie total del sólido usando la ecuación 3.1.8. La superficie calculada fue de $116.9 \text{ m}^2/\text{g}$ sólido seco, valor que se encuentra dentro del orden de magnitud reportado por Labuza (1968) para distintos alimentos, 100 a $250 \text{ m}^2/\text{g}$ sólido seco.

Con estos datos, es posible predecir las condiciones de almacenamiento para una mayor vida de anaquel de las semillas.

5.2.3. Calor de desorción.

Habiendo realizado las isotermas a distintas temperaturas, nos fue posible estudiar el comportamiento de la desorción con respecto a la ley de Clausius-Clapeyron. La aplicación de esta ley se muestra en la figura 5.3. donde se presentan las rectas obtenidas a distintos contenidos de humedad. Las pendientes de estas rectas corresponden a distintos calores de desorción. Como se puede observar, en la figura 5.4., el calor no es constante y se incrementa exponencialmente con la disminución del contenido de humedad, comportamiento predicho en el capítulo 3 (Labuza, 1968) y que explica el porque a medida que disminuye la cantidad de humedad en la muestra es más difícil su remoción en términos energéticos.

Mediante esta gráfica es posible calcular la energía que requiere la deshidratación de la semilla de uva, entre de---

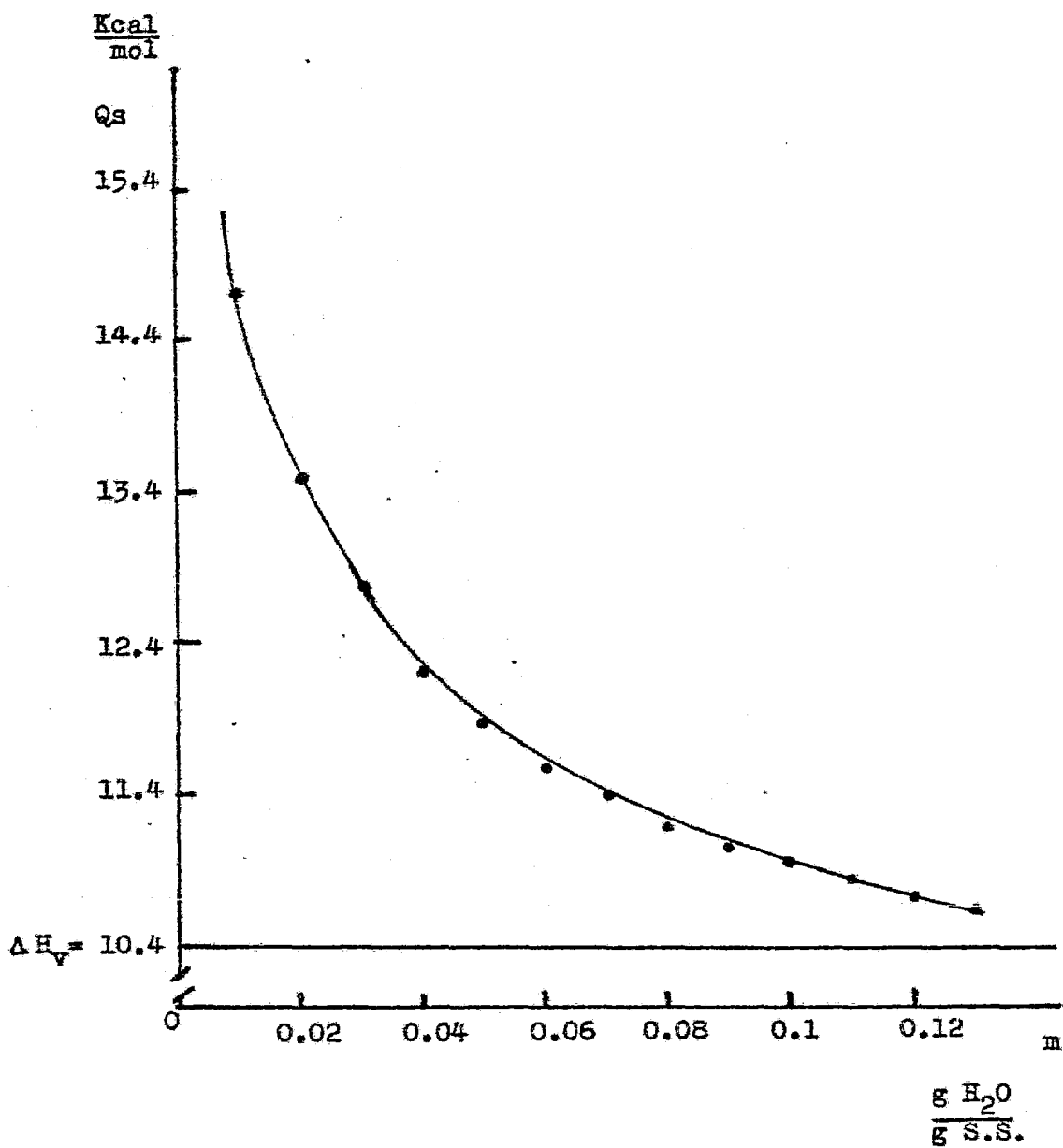


Fig. 5.4. Comportamiento del calor de desorción con respecto al contenido de humedad.

terminados contenidos de humedad.

5.3. Separación.

5.3.1. Características de los componentes del orujo.

Las densidades aparentes de la semilla de uva y del hollejo seco son: 1.176 g/cm^3 y 0.4252 g/cm^3 , respectivamente. Esta diferencia de densidades de producto seco observada en los dos componentes del orujo sugiere que su separación es factible por medio de la fluidización y el arrastre de sólidos. Esta determinación permitió estimar el diámetro equivalente de la semilla suponiendo una geometría esférica: 0.3993 cm . Por otra parte, la conformación del hollejo hizo imposible su asociación con alguna geometría específica.

5.3.2. Condiciones de fluidización. Velocidad mínima.

En las figuras 5.5. a 5.8. presentamos las gráficas de caída de presión del lecho contra la velocidad superficial del aire (datos apéndices 4.1.1. a 4.1.4.). La respuesta de la caída de presión al flujo de aire permite definir las condiciones de operación a partir de las diferentes zonas que se pueden observar: región de fluidización, velocidad mínima de fluidización, región de fluidización, velocidad terminal y región de transporte neumático de sólidos.

Como se puede observar en estas figuras la velocidad mínima de fluidización del hollejo se ve marcadamente influenciada por la densidad del mismo; así, la velocidad mínima de fluidi-

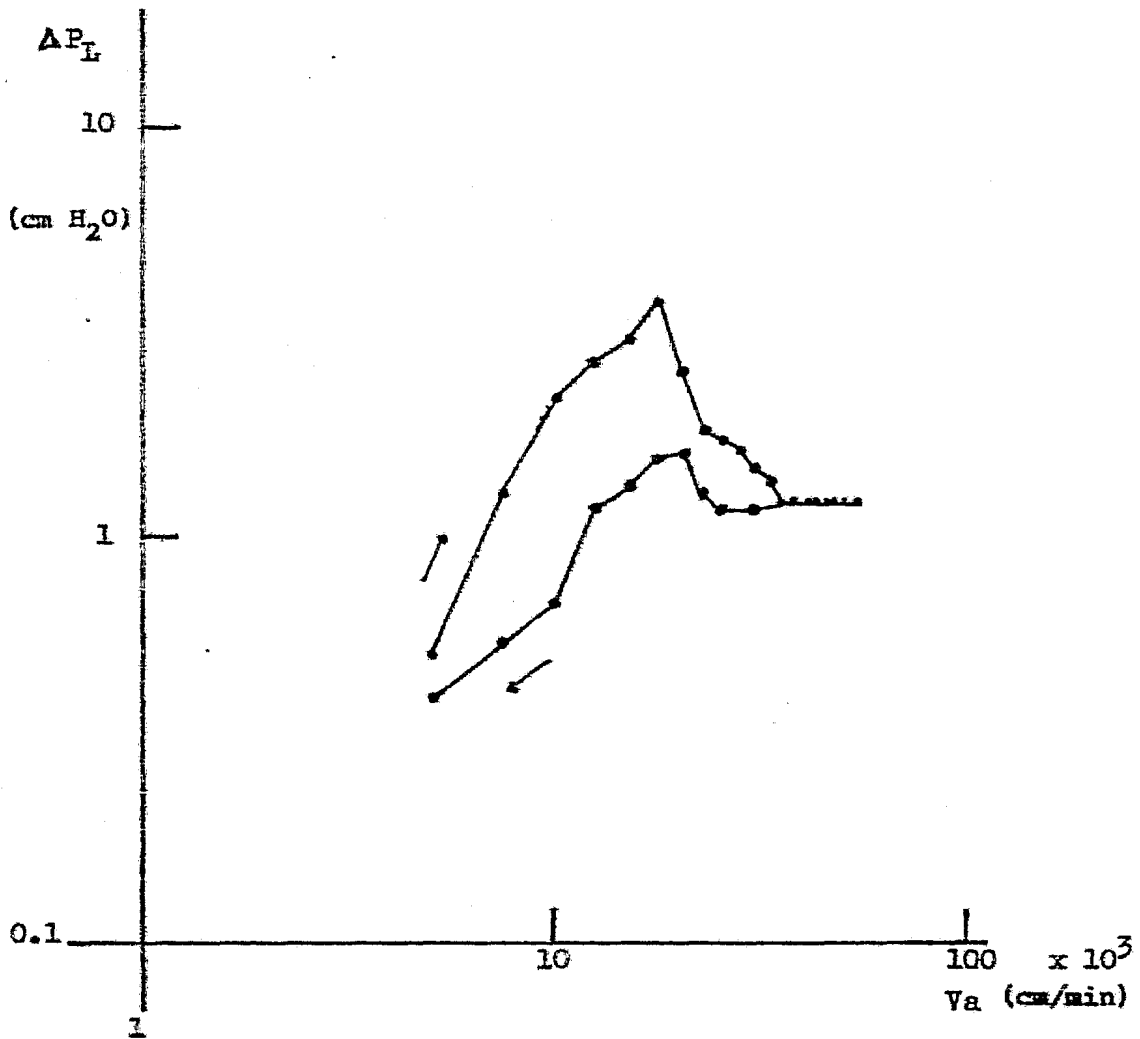


Fig. 5.5. Caída de presión vs. velocidad superficial del aire para semilla húmeda.

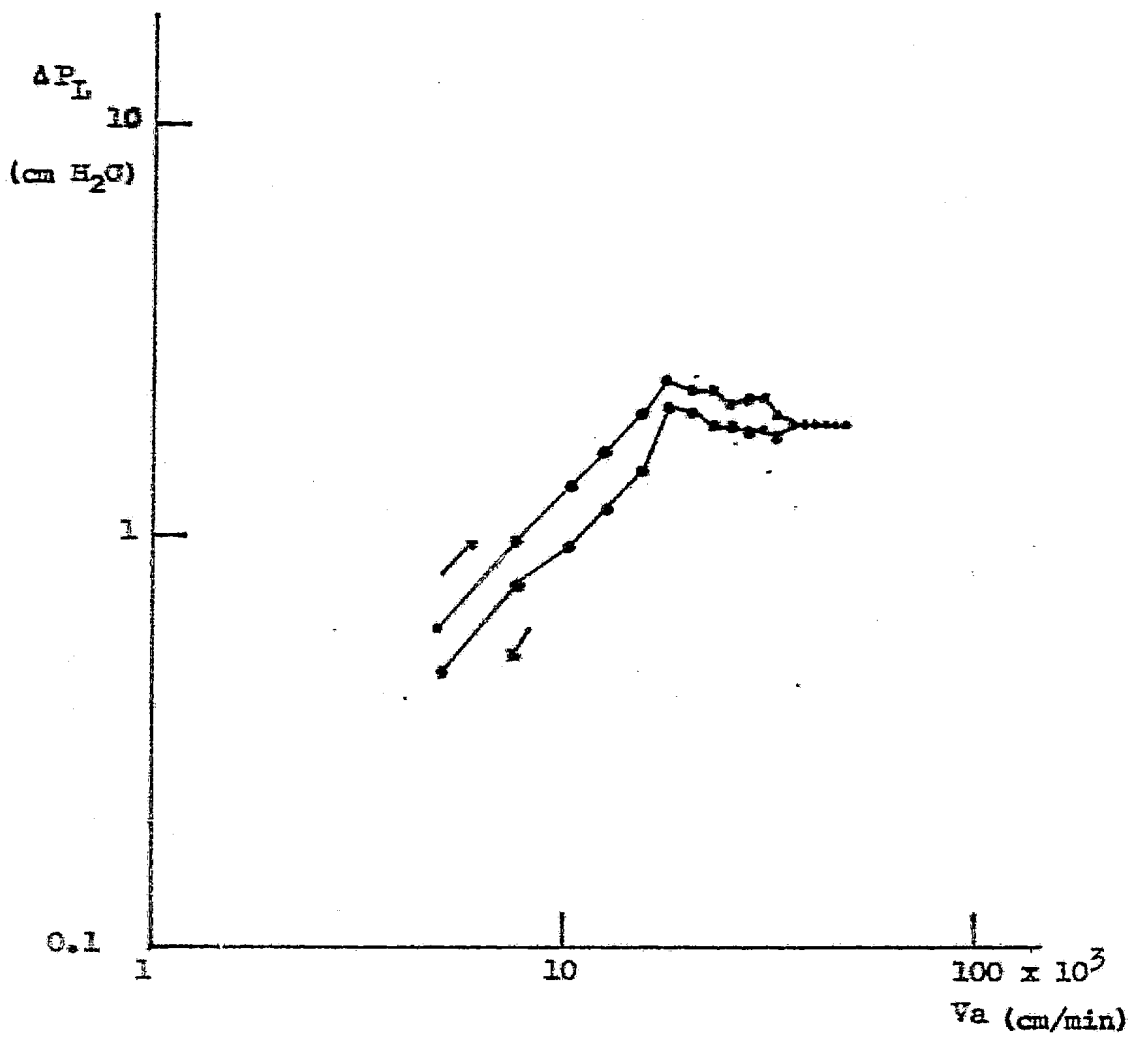


Fig. 5.6. Caída de presión vs. velocidad superficial del aire para semilla seca.

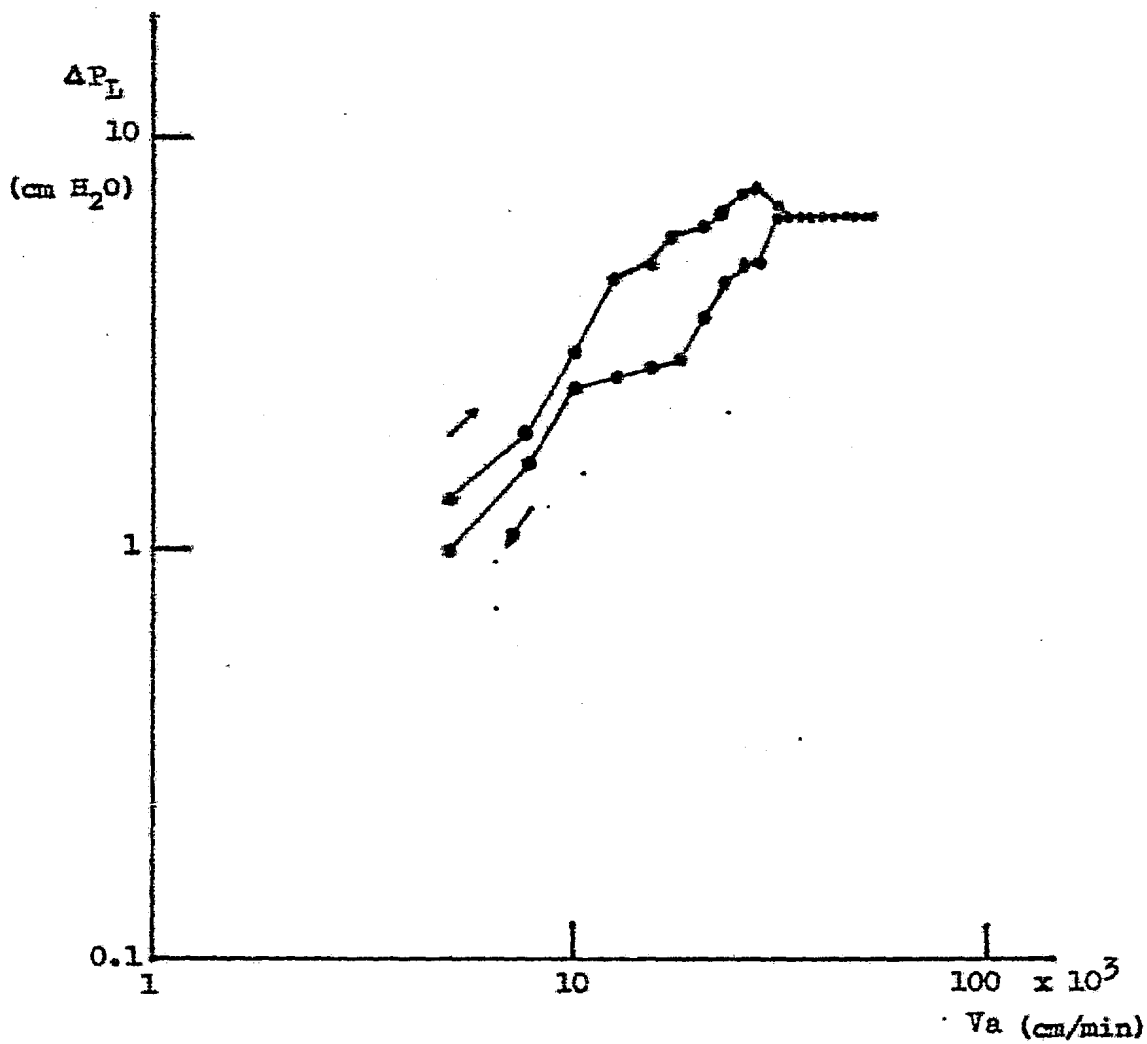


Fig. 5.7. Caída de presión vs. velocidad superficial del aire para hollejo húmedo.

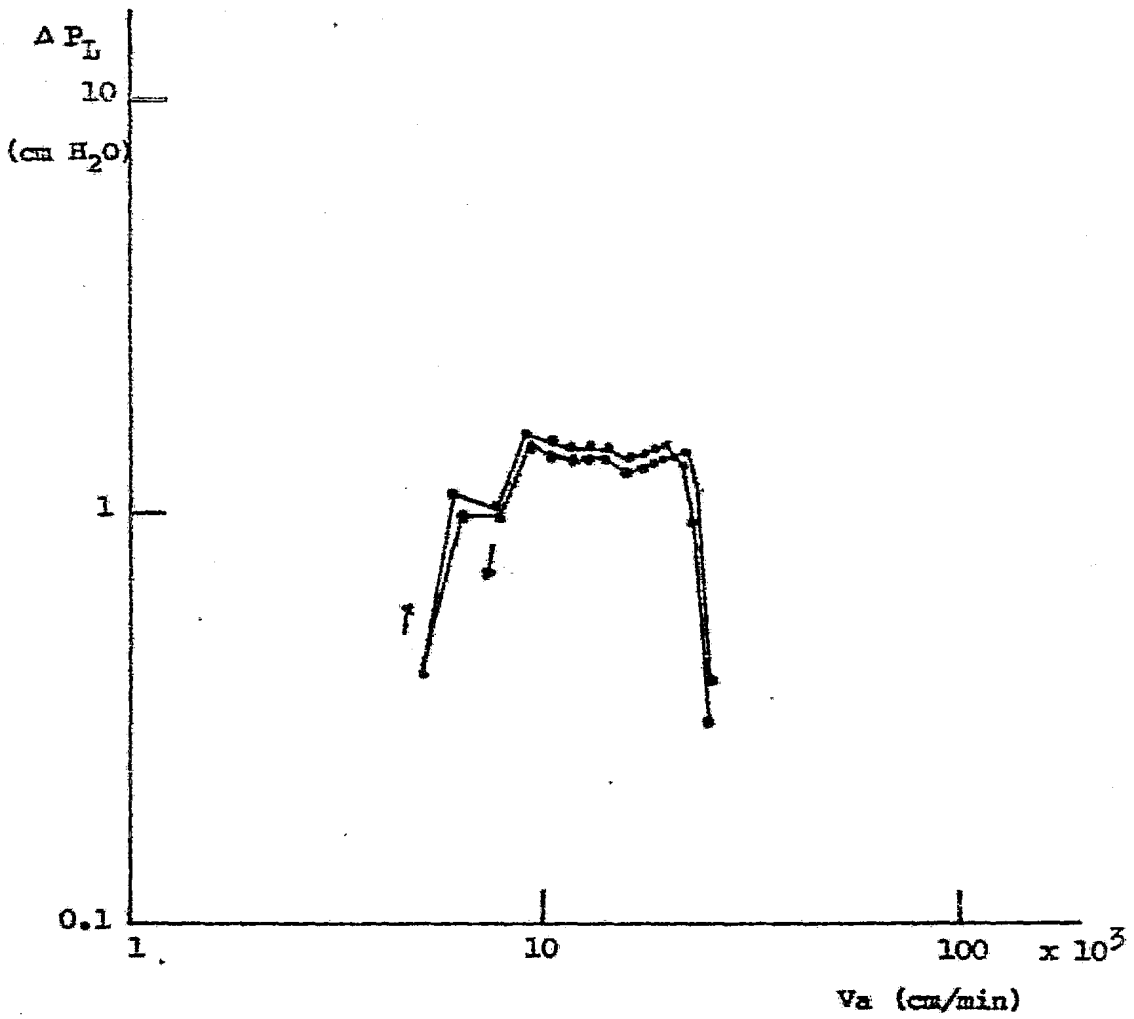


Fig. 5.8. Caída de presión vs. velocidad superficial del aire para hollejo húmedo.

zación del hollejo húmedo es mucho mayor que la del hollejo seco. Esto se debe a la gran capacidad del hollejo de retener agua. Aún más, el hollejo húmedo presenta inicialmente, una mayor densidad que la semilla; esta diferencia de densidades se invierte en el transcurso de la operación de secado hasta que al final de ésta, la velocidad mínima de fluidización de la semilla seca es mayor que la del hollejo seco.

En la ecuación 3.2.1. planteada en la sección 3.2. se indicaron los factores que influyen en la velocidad mínima de fluidización: esfericidad, densidad y diámetro de la partícula, básicamente. Comparando las características de los componentes del orujo, vemos que si bien el hollejo no tiene una geometría esférica y su esfericidad es menor a la unidad, este hecho no influye grandemente sobre la velocidad mínima de fluidización con respecto a la semilla. Por otra parte, la mayor densidad de el hollejo se traduce en una mayor velocidad mínima de fluidización de los componentes del orujo.

Para la selección de las velocidades superficiales de aire, determinamos la velocidad mínima de fluidización de la semilla seca como límite mínimo de trabajo. Dicho esto en términos numéricos, a partir de la velocidad mínima de fluidización de la semilla seca, 20 186 cm/min definimos las velocidades de trabajo. Por otra parte, la velocidad mínima de fluidización de el hollejo seco es de 8 930 cm/min y su velocidad terminal, es-

to es, la velocidad que marca el inicio de arrastre de sólidos, es de 20 186 cm/min. En otras palabras, la condición de transporte de hollejo seco tendría lugar a la velocidad correspondiente a la mínima de fluidización de la semilla seca. Bajo las condiciones de operación de este trabajo, la velocidad terminal de las semillas no pudo ser observada. Sin embargo, la conducta de la carga en el secador sugiere que la velocidad de transporte no debe ser mucho mayor de 50 500 cm/min, velocidad superficial máxima de trabajo, ya que a estas condiciones, los volúmenes expandidos del lecho son muy parecidos al volumen total del secador.

Otro comportamiento que merece nuestra atención es la expansión de la zona de transición entre el lecho fijo y el lecho fluidizado en la semilla húmeda, y en menor grado en el hollejo húmedo, lo cual se traduce en un aumento en la caída de presión al inicio de la región de fluidización, como observamos en las figuras 5.5. y 5.7. Este hecho lo podemos explicar por la tendencia de las partículas a aglomerarse, debido a su alto contenido de humedad, tal como lo reporta Baxerres (1982).

5.3.3. Velocidades de separación.

En esta investigación estudiamos la influencia de la velocidad del fluido, de la temperatura y del L/D sobre la velocidad de transporte en un sistema de dos componentes, hollejo-semilla. Para evitar que la capacidad de aglomeración de estos

componentes provocara oclusión en el secador, el contenido de humedad inicial del orujo (80%) fue reducido hasta un contenido de humedad inicial para las corridas de 60 % (B.H.), mediante una operación de presecado.

Las figuras 5.9. y 5.10. muestran la relación entre el tiempo y la fracción en el lecho de sólidos en base seca. - Las primeras gráficas se refieren al efecto de la velocidad superficial del aire sobre la velocidad de separación y el segundo conjunto a la dependencia de esta velocidad con respecto a la relación L/D. Finalmente la gráfica 5.11. presenta el efecto de la temperatura. Presentamos los datos para la construcción de estas gráficas en los apéndice 4.2.1 a 4.2.3.

En base a estas gráficas, realizamos el tratamiento matemático para calcular la constante de velocidad de separación (k), mediante el modelo de Leva (1959). Mostramos los valores de k en la tabla 5.1. En esta tabla podemos observar que conforme aumenta el flujo de aire se incrementa la velocidad de separación. El efecto contrario se observa al aumentar el L/D: la velocidad de separación disminuye al trabajar con mayores cargas en el secador. Con respecto a la influencia de la temperatura no se ve marcada dependencia de este parámetro sobre la velocidad de separación.

El modelo lineal de Leva explicó la separación hasta la concentración crítica de fracción de sólidos en el lecho. A

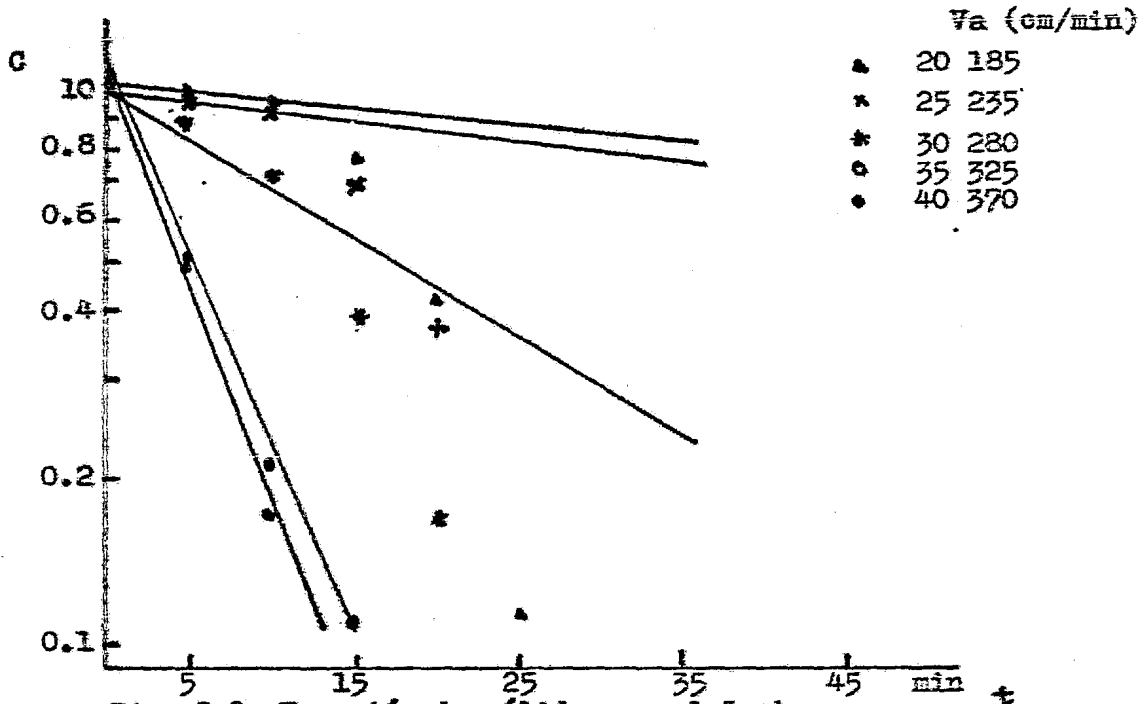


Fig. 5.9. Fracción de sólidos en el lecho vs. tiempo para distintas velocidades de aire.

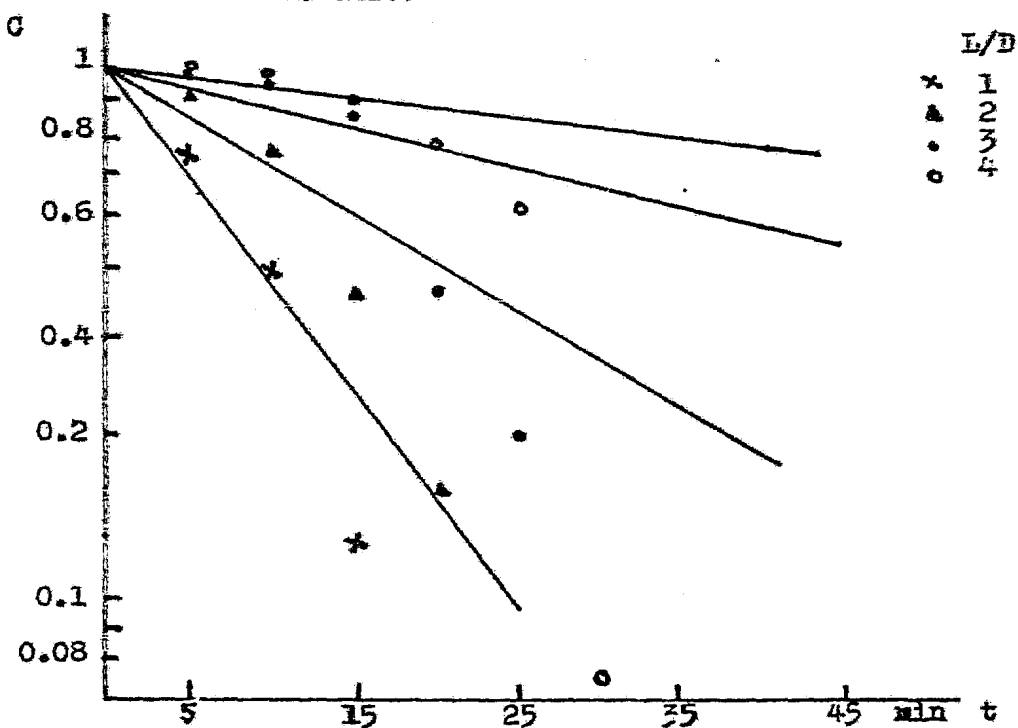


Fig. 5.10. Fracción de sólidos en el lecho vs. tiempo para distintos L/D.

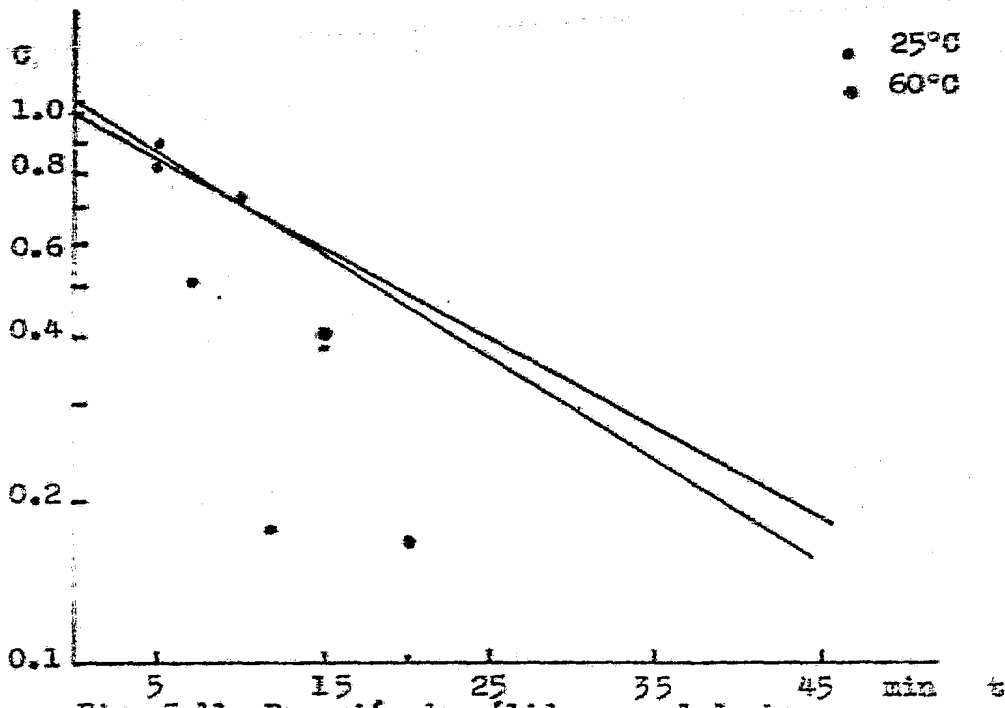


Fig. 5.11. Fracción de sólidos en el lecho vs. tiempo a distintas temperaturas.

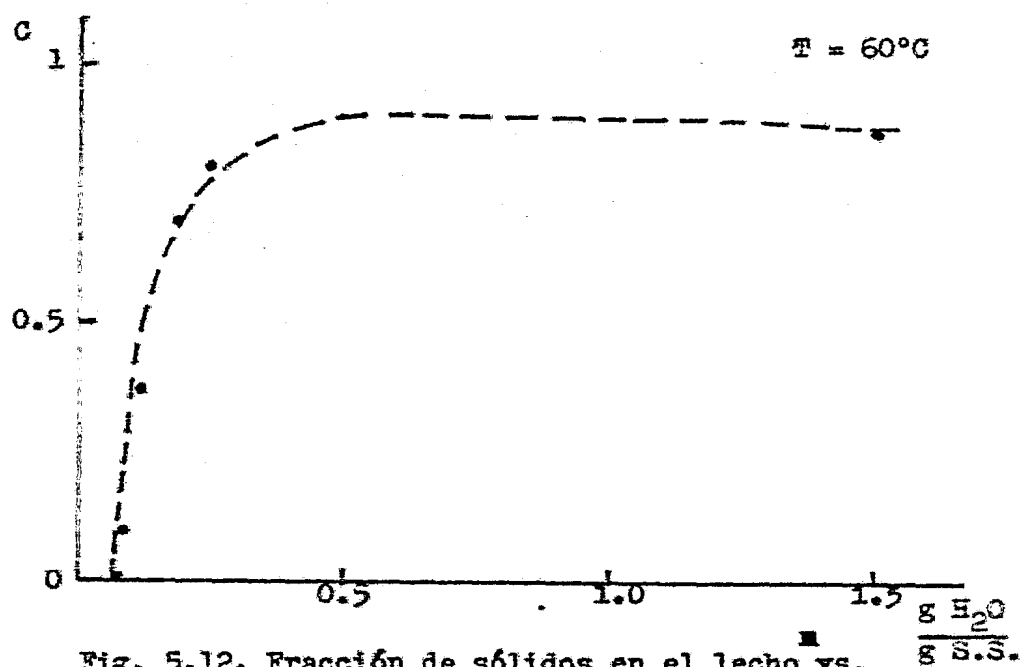


Fig. 5.12. Fracción de sólidos en el lecho vs. contenido de humedad de los mismos.

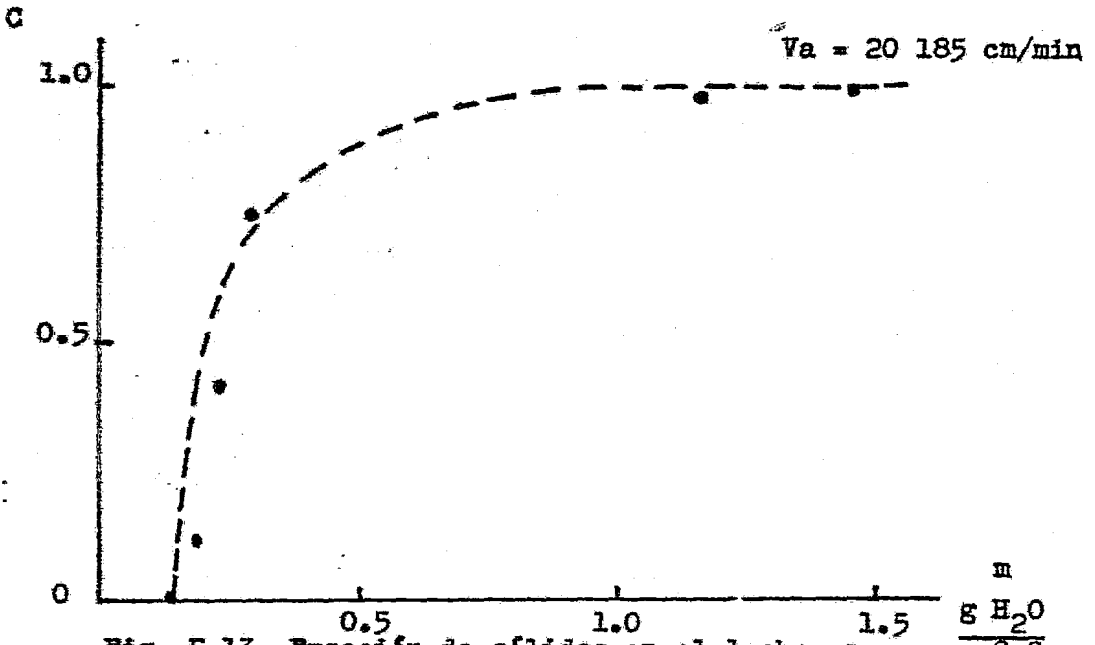


Fig. 5.13. Fracción de sólidos en el lecho vs. contenido de humedad de los mismos.

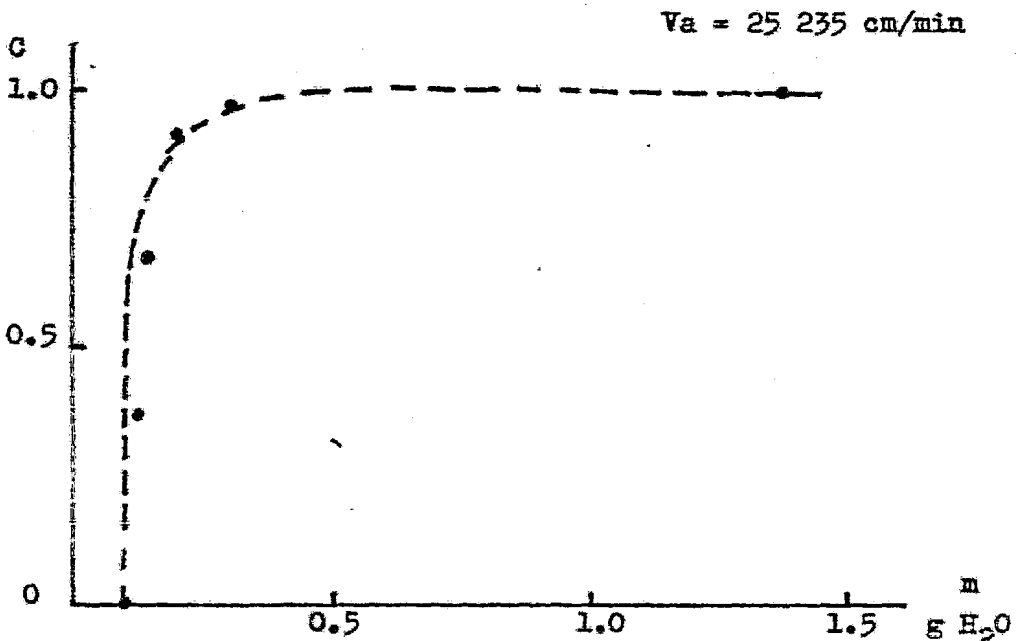


Fig. 5.14. Fracción de sólidos en el lecho vs. contenido de humedad de los mismos.

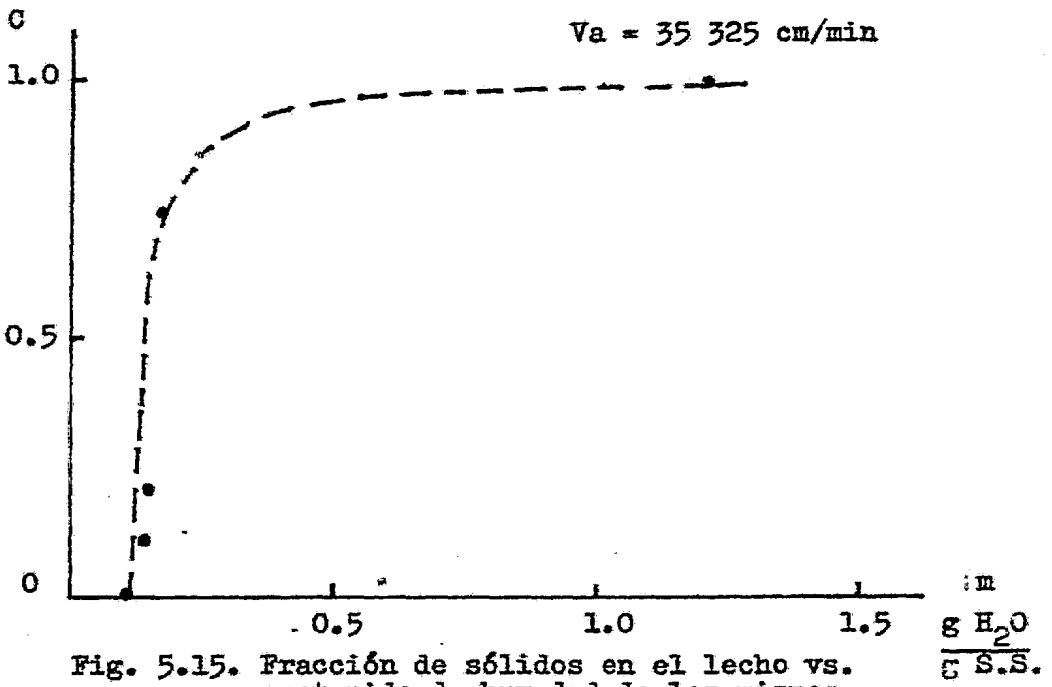


Fig. 5.15. Fracción de sólidos en el lecho vs. contenido de humedad de los mismos.

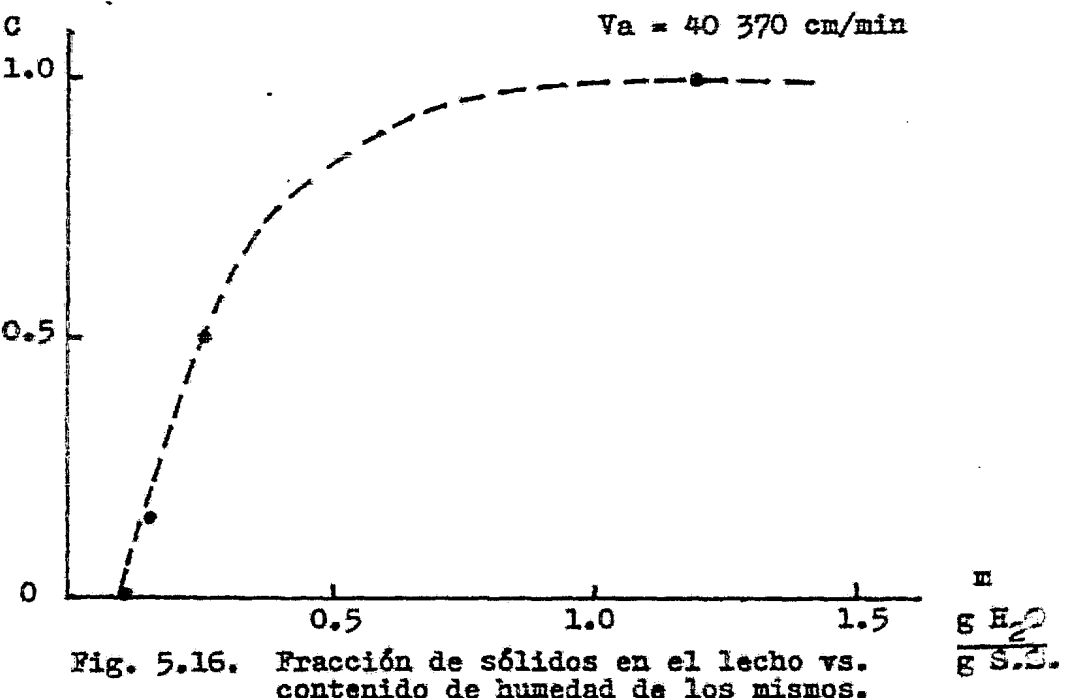
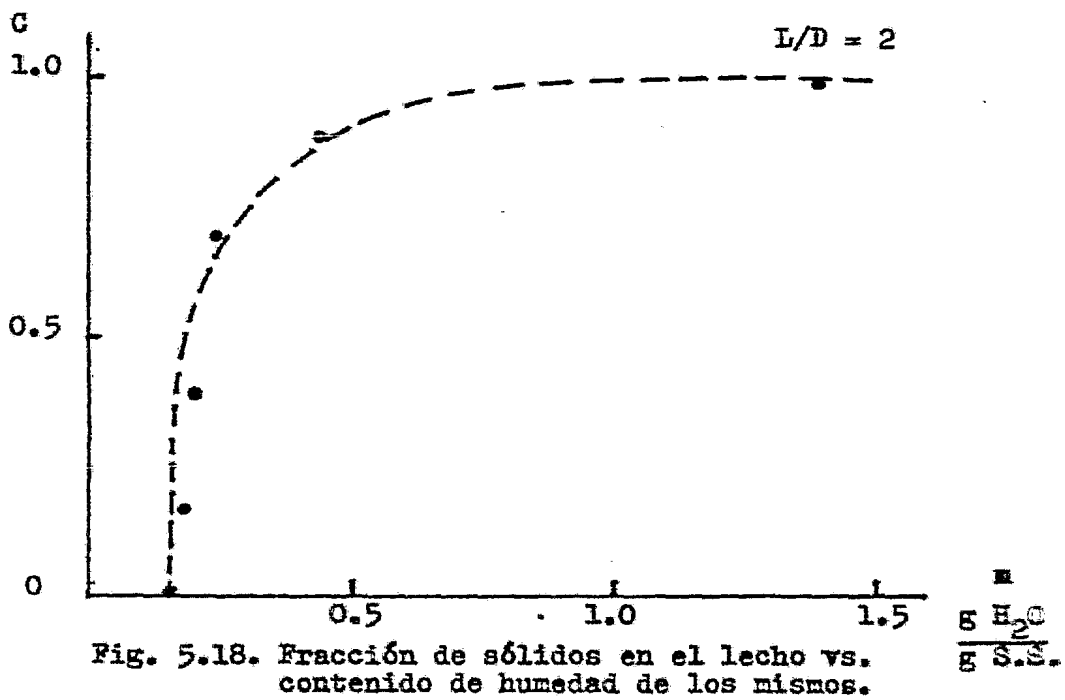
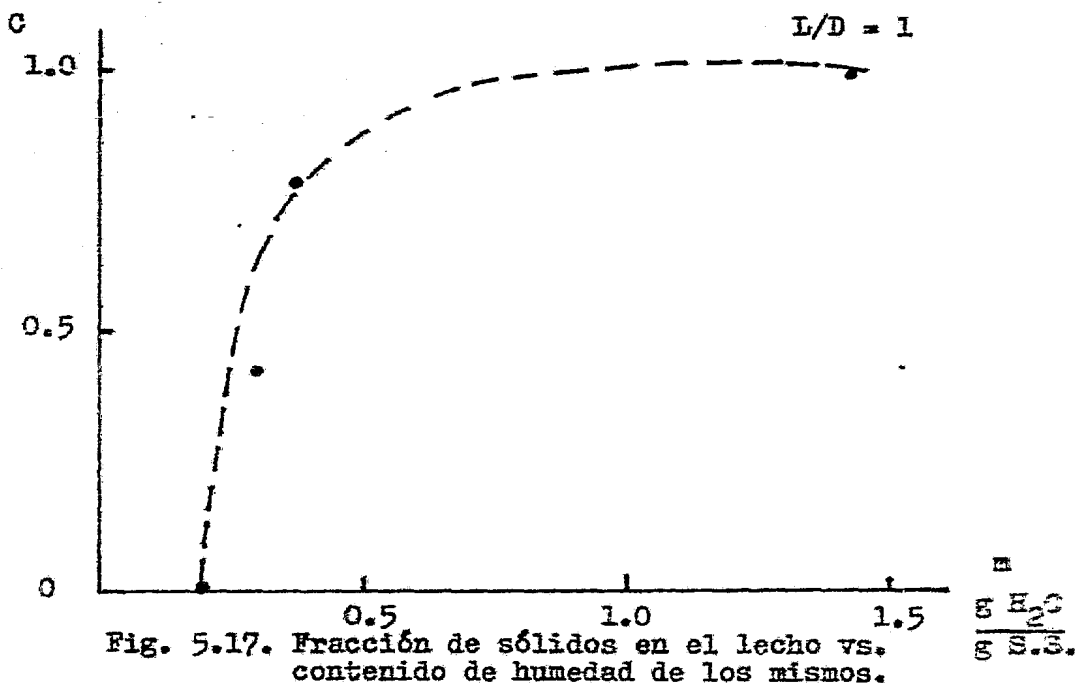


Fig. 5.16. Fracción de sólidos en el lecho vs. contenido de humedad de los mismos.



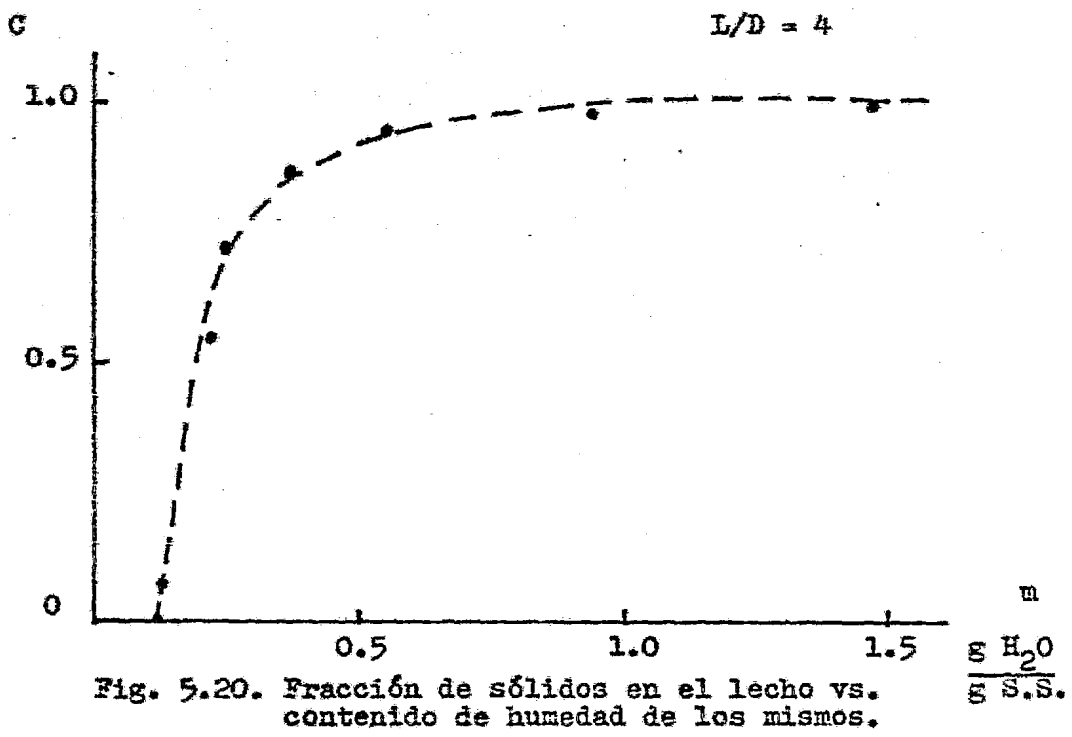
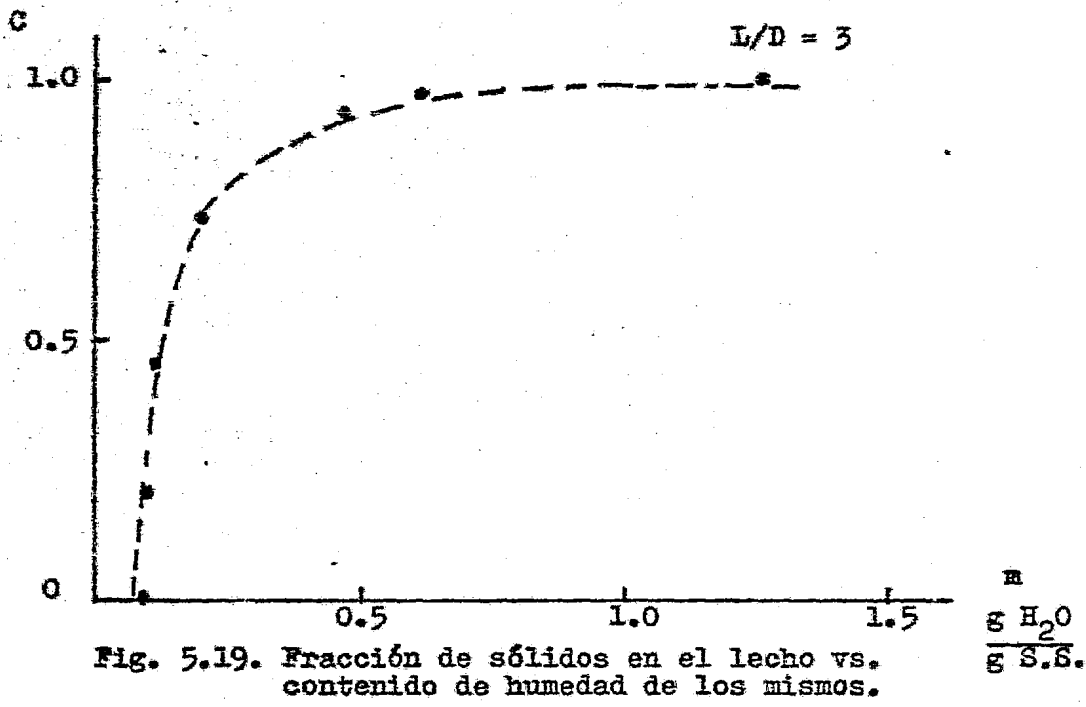


Tabla 5.1. Constante de velocidad de separación.

$T = 25^{\circ}\text{C}$	$V_a = 30\ 280$ cm/min	L/D	k (min^{-1})
		1	- 0.09590
		2	- 0.04192
		3	- 0.01014
		4	- 0.00936
L/D = 2	$V_a = 30\ 280$ cm/min	T $^{\circ}\text{C}$	k (min^{-1})
		25	- 0.04192
		60	- 0.03770
T = 25°C	L/D = 2	V_a (cm/min)	k (min^{-1})
		20 185	- 0.00621
		25 235	- 0.00831
		30 280	- 0.04192
		35 325	- 0.15653
		40 370	- 0.17758

partir de esta concentración observamos que había un aumento en la velocidad de separación, el hollejo se seca y como su cambio de densidades es muy pronunciado, llegado a un punto, su velocidad de separación se incrementa notablemente.

Construimos las gráficas 5.12. a 5.20. con los datos enlistados en los apéndices 4.2.1. a 4.2.3., en las cuales se presenta la relación entre el contenido de humedad del hollejo separado y la fracción de sólidos en el lecho para las corridas experimentales antes descritas. Como podemos observar hay dos zonas perfectamente diferenciadas en estas gráficas; una primera región de secado, básicamente, seguida por una región de separación. Esto es, al inicio de la operación cuando hay todavía, una gran cantidad de hollejo en el lecho, se tiene un rápido decrecimiento del contenido de humedad y una vez alcanzado el contenido de humedad crítico, la fracción de sólidos disminuye rápidamente.

5.4. Secado de semilla de uva.

5.4.1. Coeficientes de transferencia de masa.

Las figuras 5.21. a 5.30. muestran los perfiles modelados de secado a distintas condiciones de trabajo y los puntos experimentales de cada curva. Las tablas de resultados donde reportamos el contenido de humedad, tiempo, contenido de humedad reducido y contenido de humedad calculado se encuentran en los

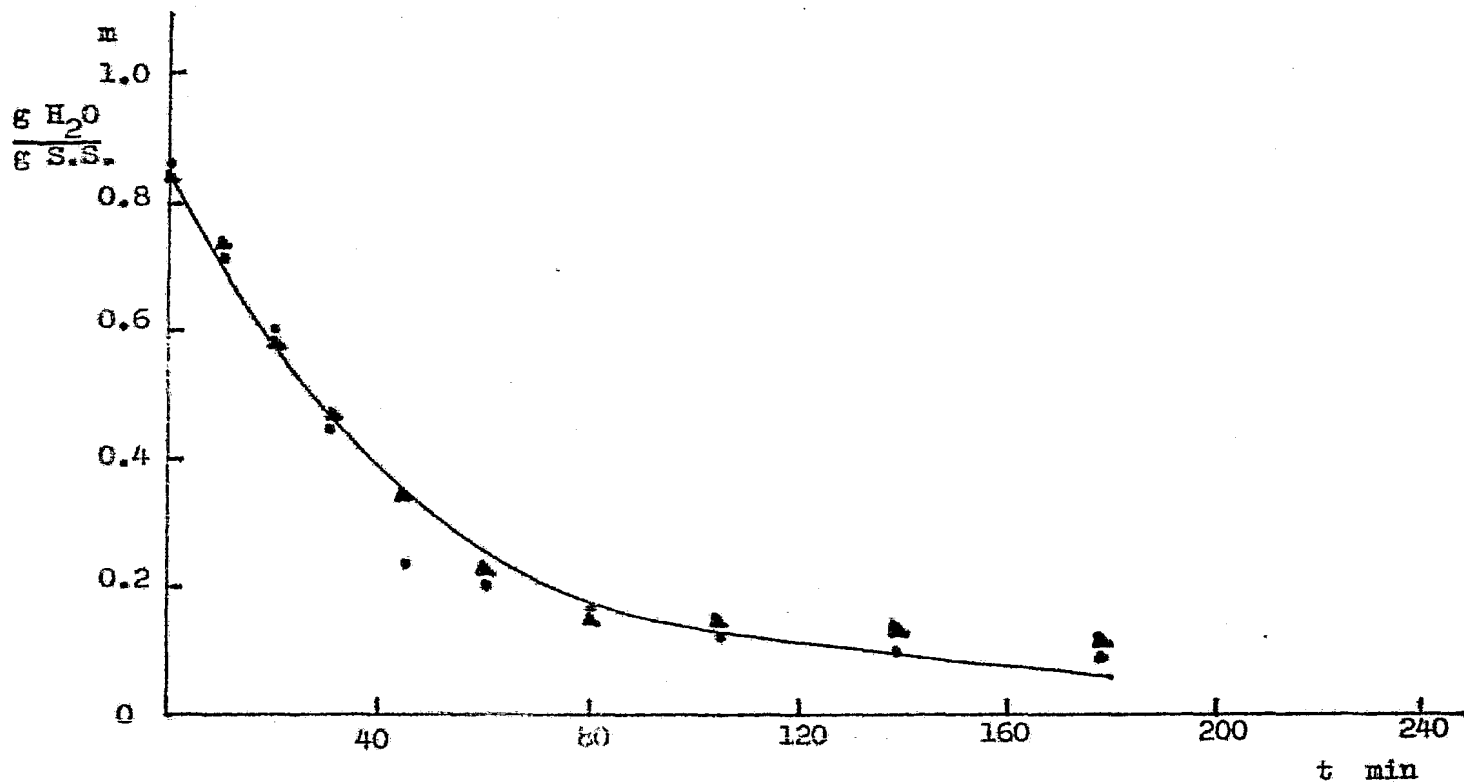


Fig. 5.21. Curva de secado a 25°C, 30 280 cm/min y L/D = 0.5.

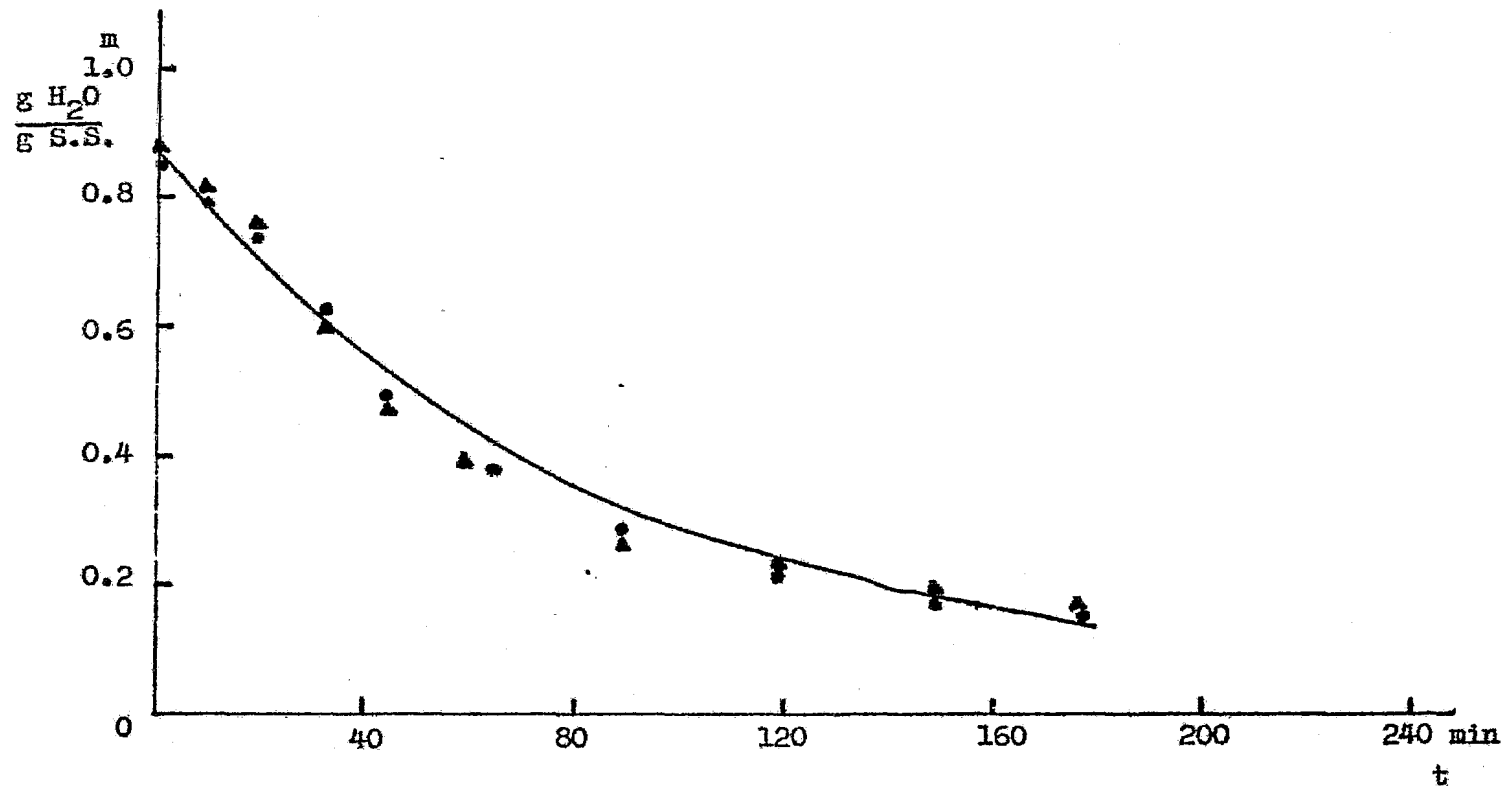


Fig. 5.22. Curva de secado a 25°C, 30 280 cm/min y $L/D = 1.5$.

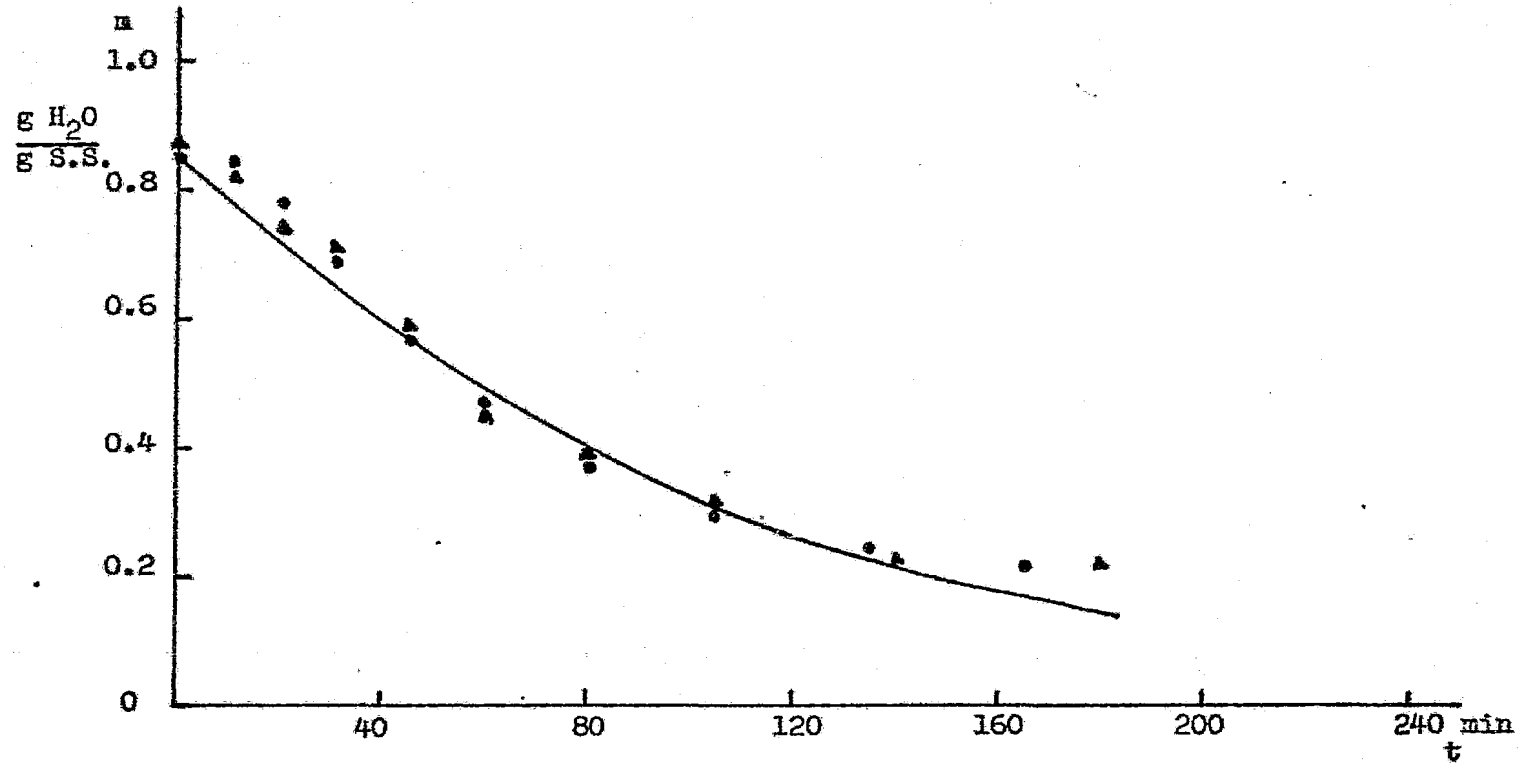


Fig. 5.23. Curva de secado a 25°C, 30 280 cm/min y L/D = 2.0.

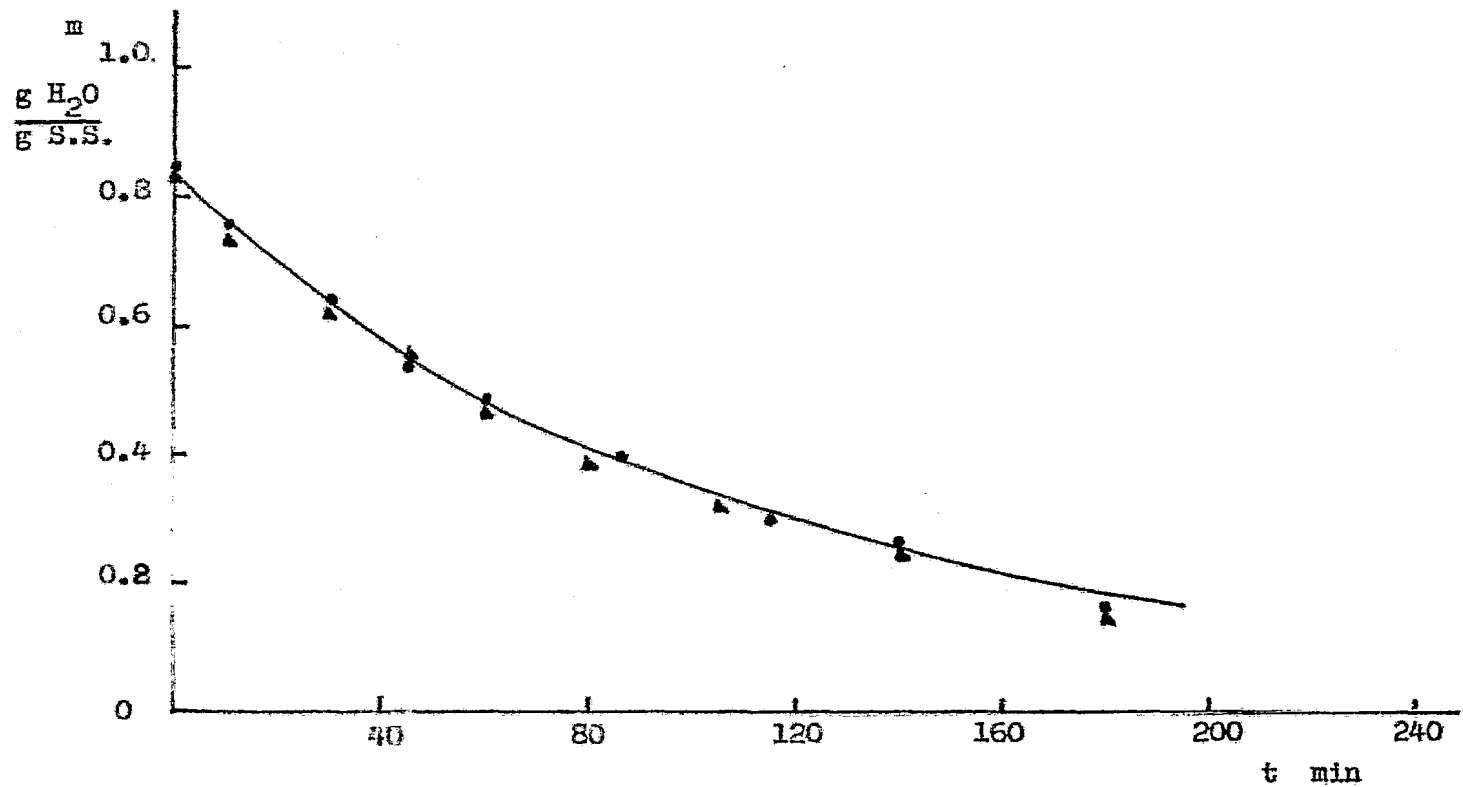


Fig. 5.24. Curva de secado a 25°C, L/D = 1 y 20 185 cm/min.

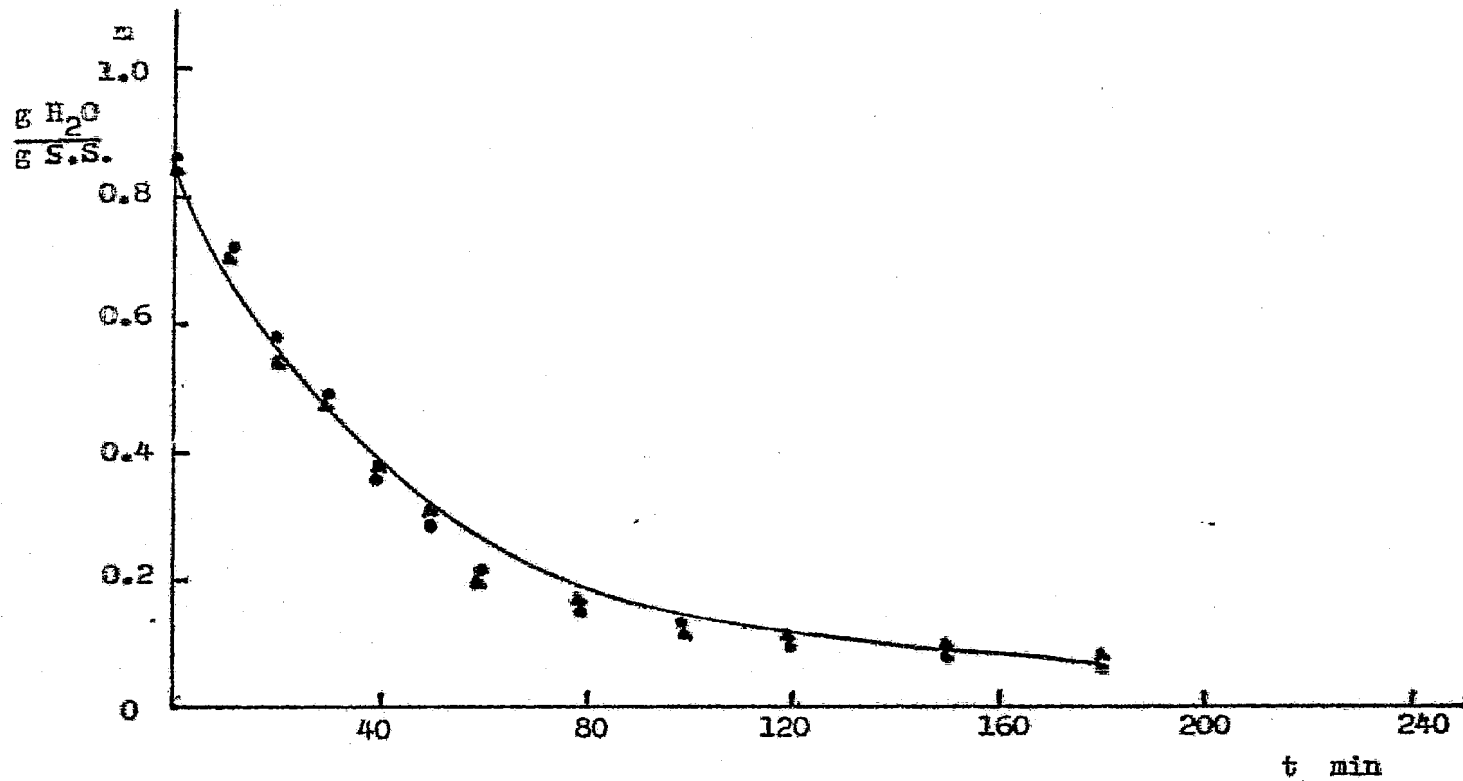


Fig. 5.25. Curva de secado a 25°C, L/D = 1 y 35 325 cm/min.

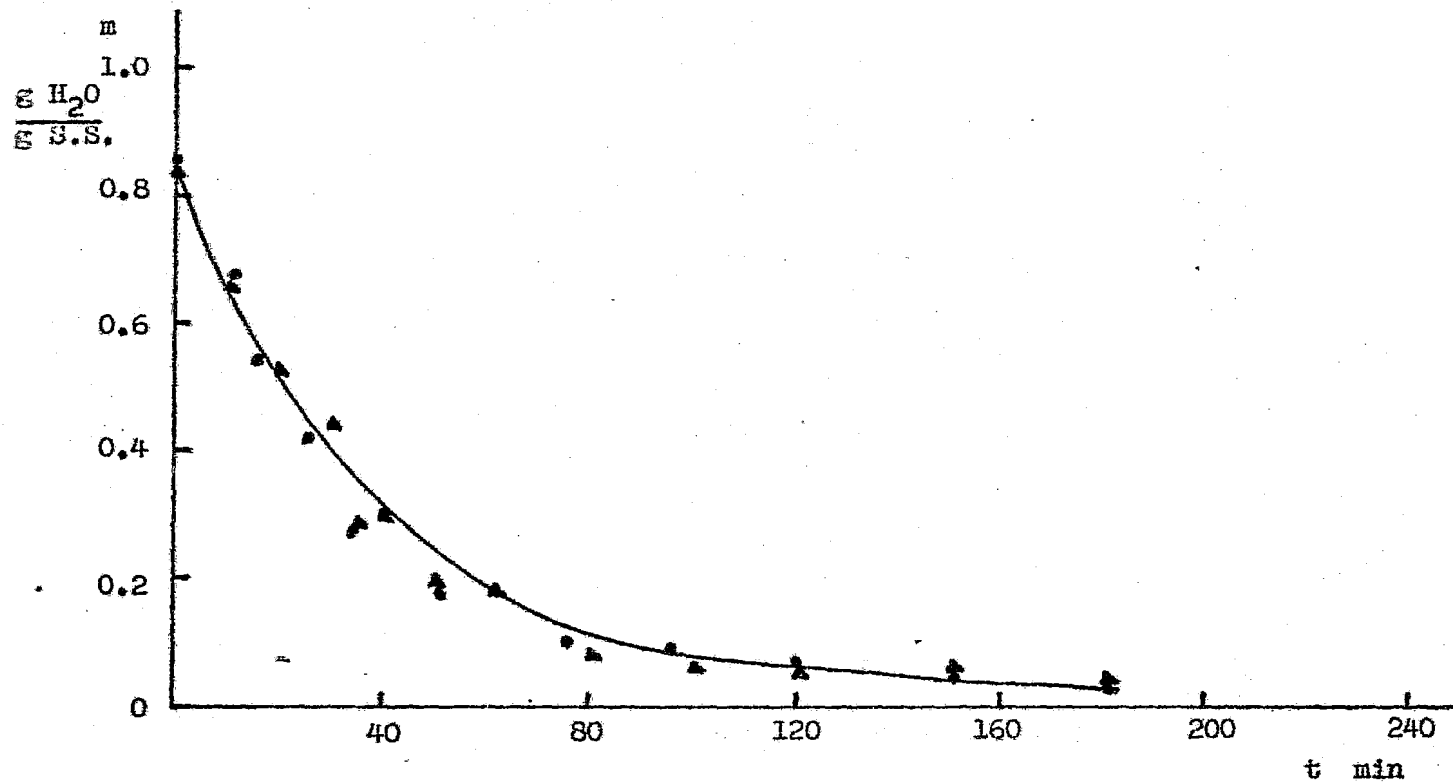


Fig. 5.26. Curva de secado a 25°C, L/D = 1 y 45 420 cm/min.

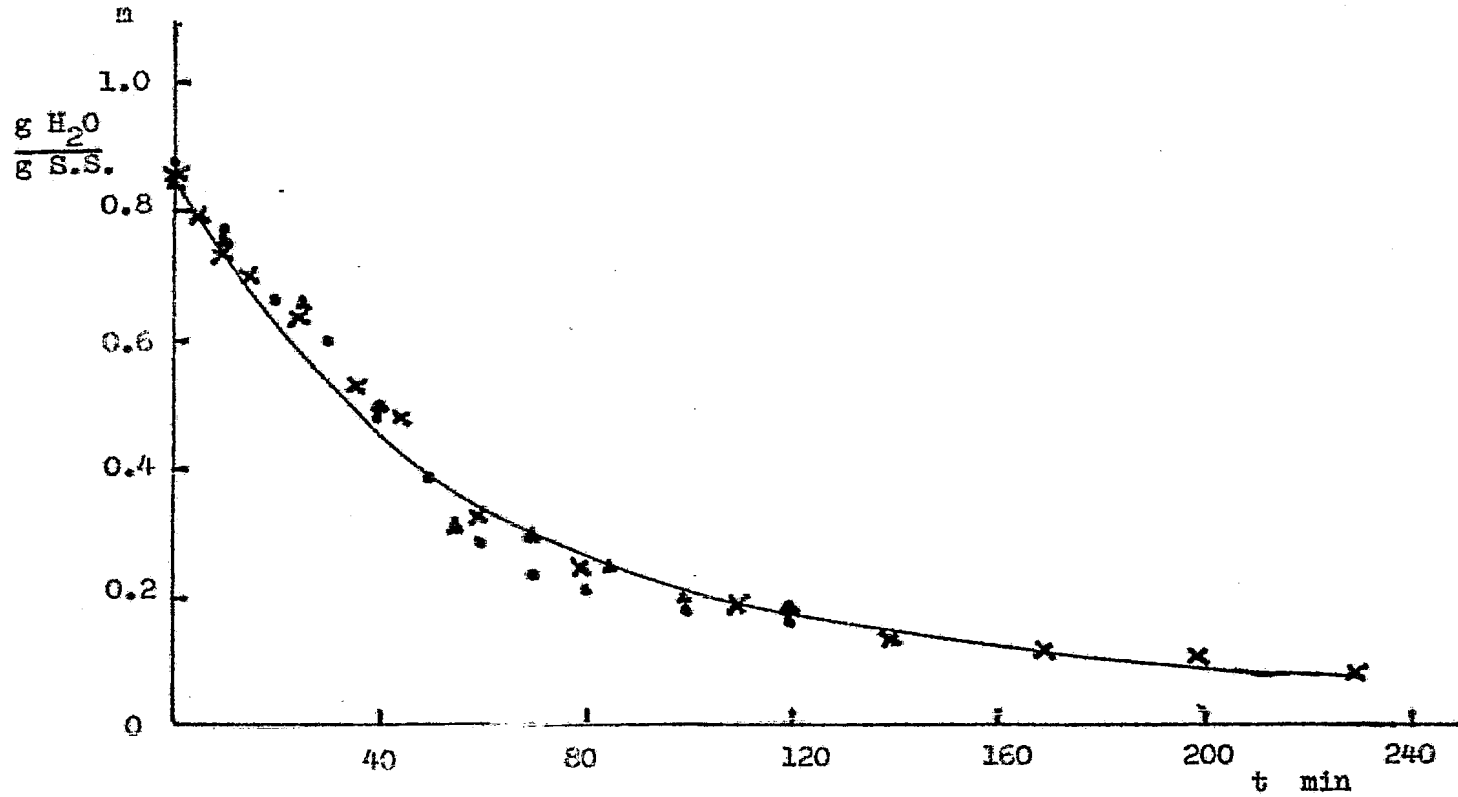


Fig. 5.27. Curva de secado a 30 280 cm/min, L/D = 1 y 25°C.

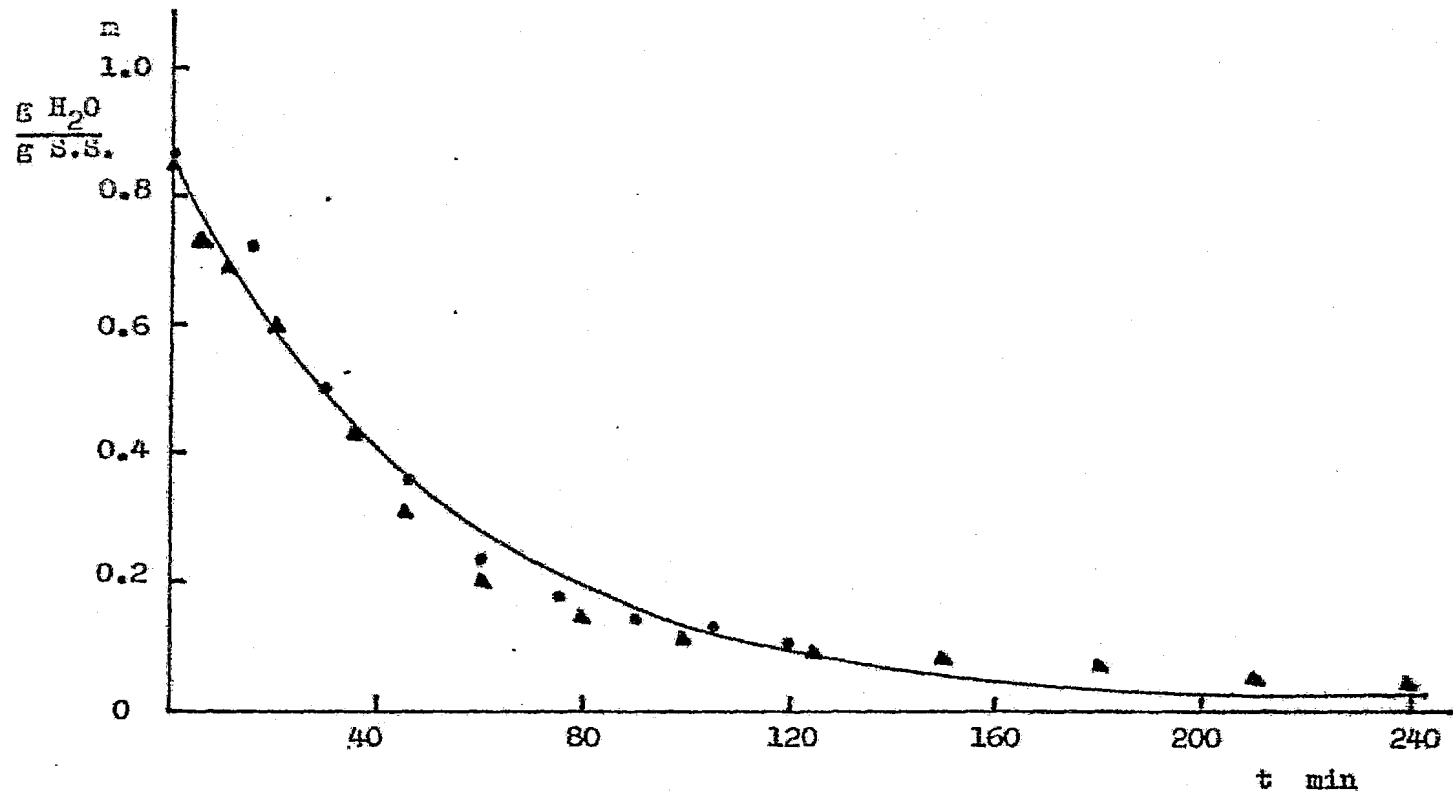


Fig. 5.28. Curva de secado a 30 280 cm/min, L/D = 1 y 40°C.

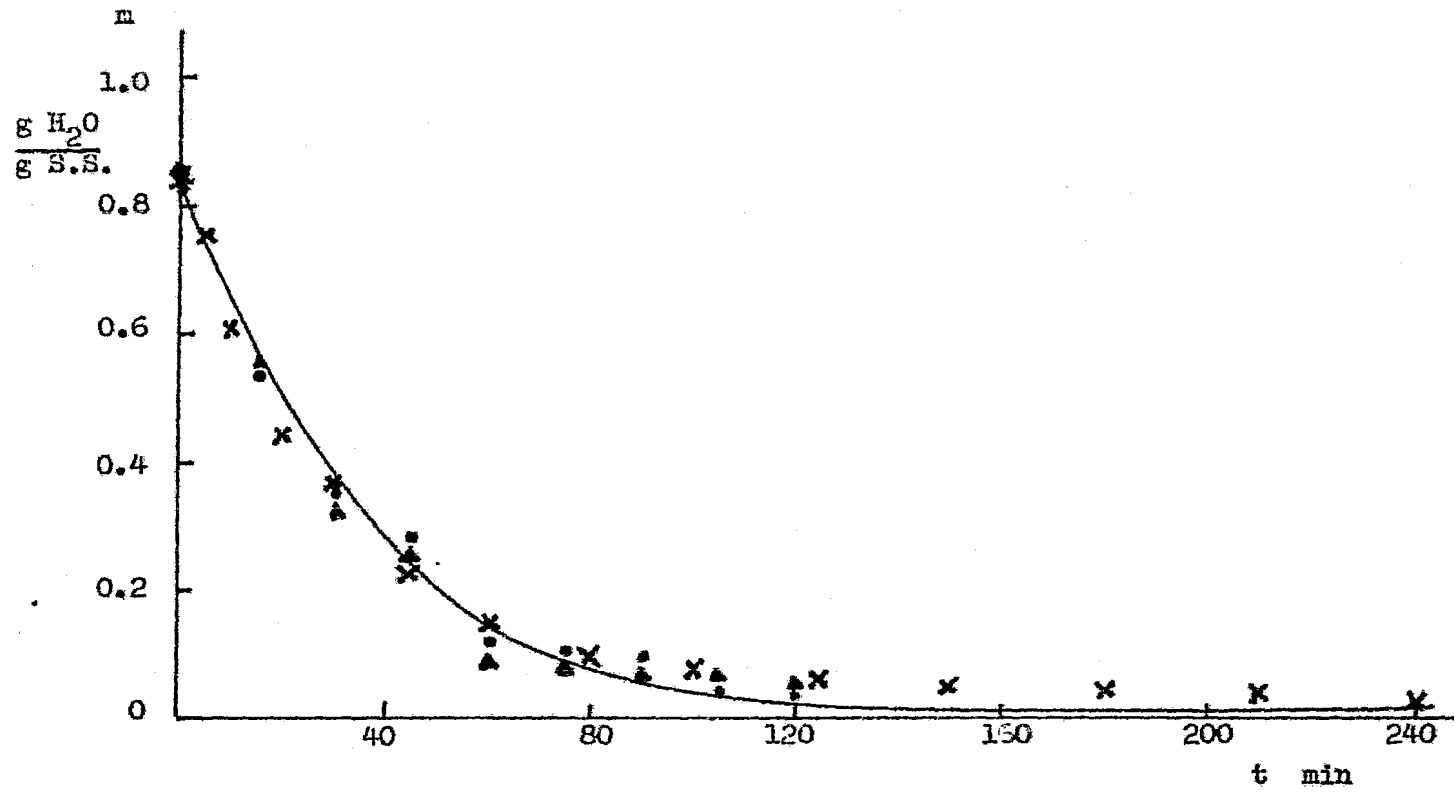


Fig. 5.29. Curva de secado a 30 280 cm/min, L/D = 1 y 50°C.

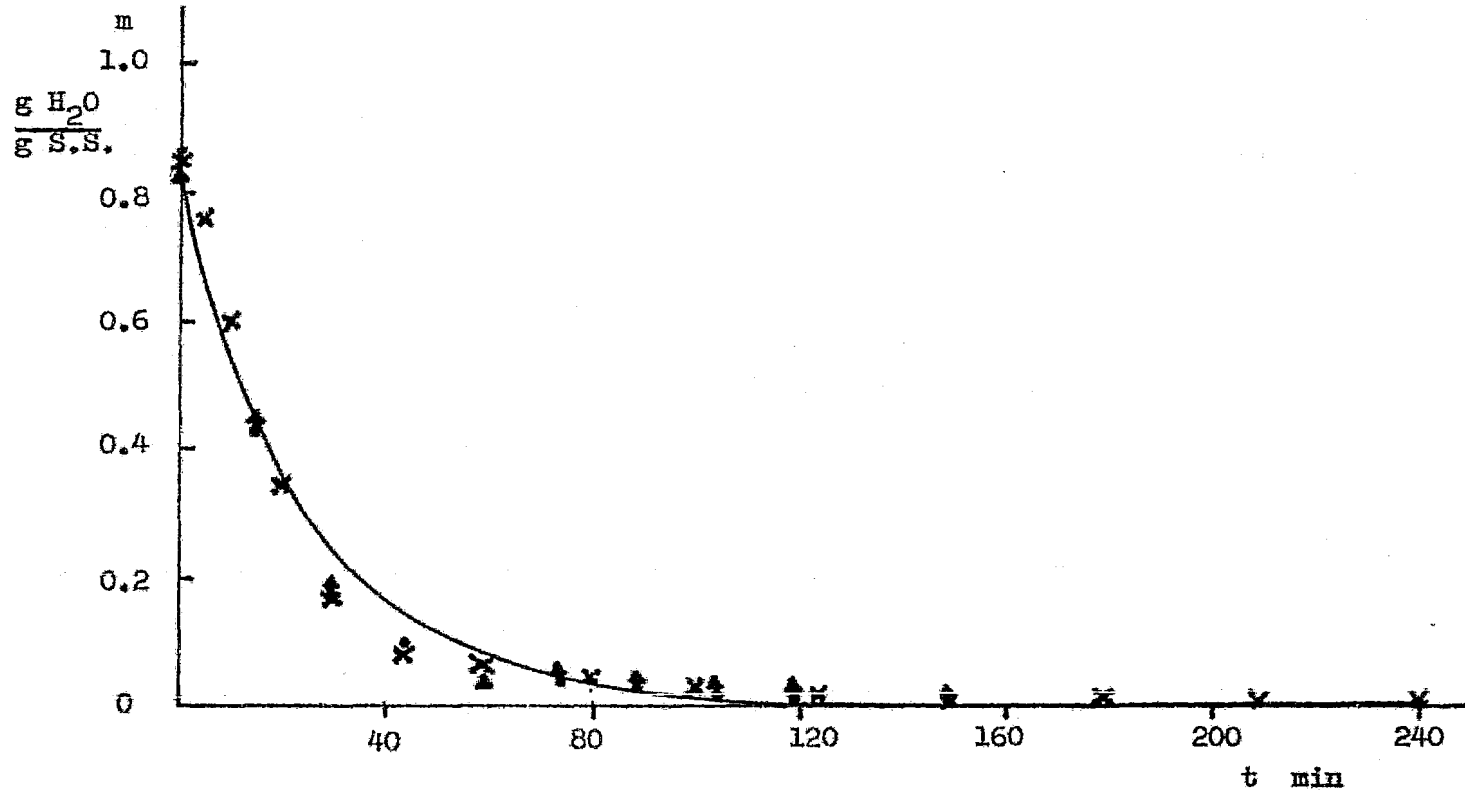


Fig. 5.30. Curva de secado a \dot{D} 220 cm/min, $L/D = 1$ y 65°C .

apéndices 5.3.1. a 5.3.10. En la parte inferior de estas tablas, se indican las condiciones de trabajo y los coeficientes de --- transferencia de masa, externo e interno, para cada caso.

Es frecuente que el secado de los alimentos no presen- te un período de velocidad constante de secado (Baxerres et al., 1982). Este fue el caso para la deshidratación de semillas de - uva. En las figuras 5.21. a 5.30. podemos observar que no hay - un período de secado constante al inicio de la operación, com-- portamiento que se hubiera traducido en una caída de humedad i i- neal con el tiempo. Por lo contrario, el perfil de estas gráfi- cas muestra una velocidad siempre decreciente como corresponde a una operación caracterizada solo por secado decreciente.

Para describir este comportamiento, aplicamos el mode- lo de difusión molecular del líquido, mediante la solución a la ecuación de Fick, que contempla el efecto de la resistencia a - la transferencia de masa externa. (ver sección 3.3.2.).

En la aplicación de este modelo, fue necesario que tra- dujeramos los datos de contenido de humedad a humedad reducida e hicieramos una gráfica con los logaritmos de estos valores -- contra el tiempo. Tal como se muestra en la figura 5.31. para - uno de los casos estudiados. La solución al modelo propuesto es- tá dado en términos de series de Fourier. Para valores de m^* me- nores a 0.6, la relación entre el logaritmo de m^* y el tiempo, se reduce a una línea recta. De esta sección lineal se puede ob-

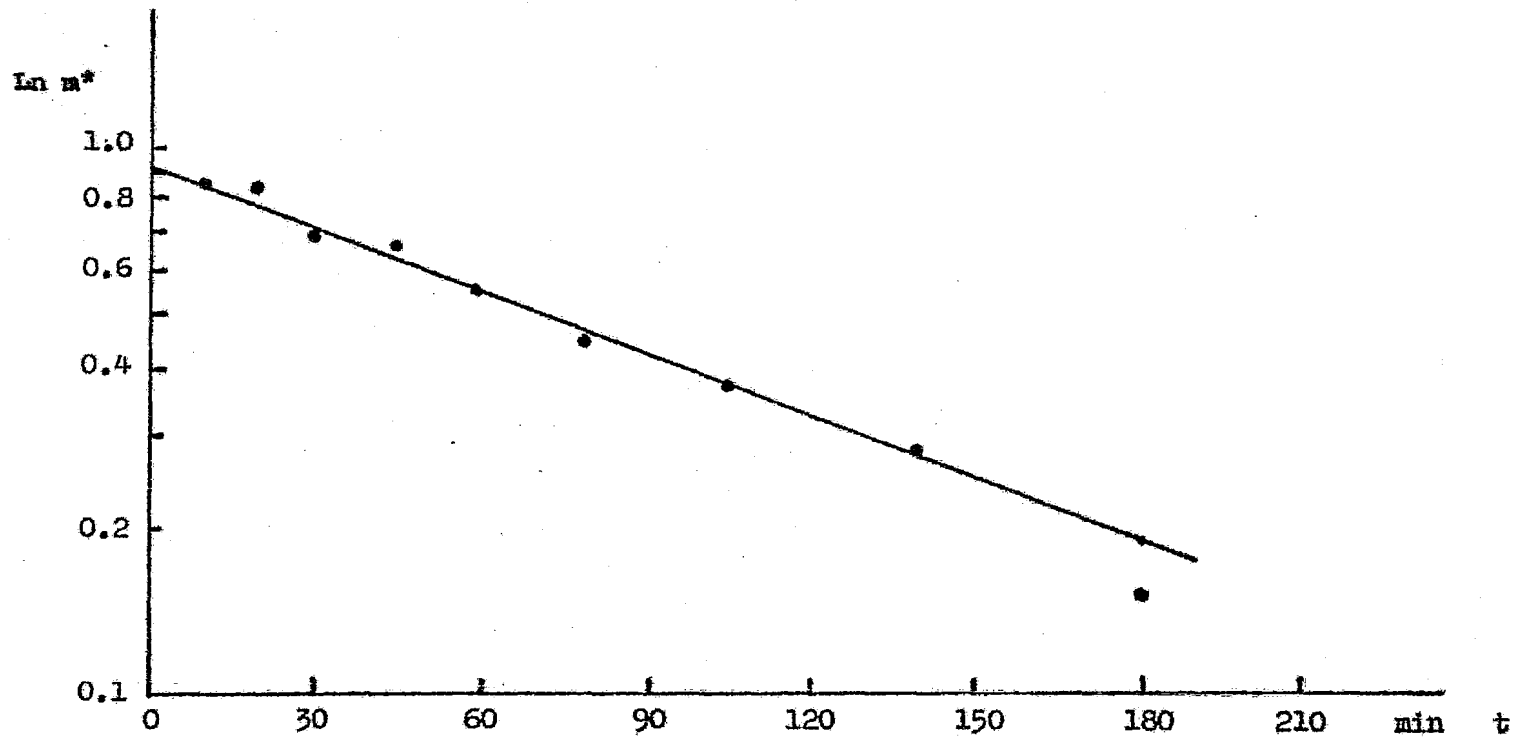


Fig 5.31. $\ln m^*$ vs. tiempo para el caso de $L/D = 1$, $V_a = 20\ 185$ cm/min
y $T = 25^\circ\text{C}$.

tener el valor de la ordenada en el origen, $\ln \frac{6L^2}{\beta^2 [1^2 + L(L-1)]}$ y de la pendiente, $\frac{D\beta^2}{R^2}$.

Con estos datos es posible calcular las distintas constantes y coeficientes de la solución a este modelo: L , no. de Biot; β , beta; D , coeficiente interno de difusión y K_c , coeficiente externo de transferencia de masa.

El cálculo de estas constantes y de los coeficientes lo realizamos por iteraciones y lo esquematizamos en la figura 5.32. Además presentamos un ejemplo de cálculo en el apéndice 6.

En las tablas 5.2. a 5.4. presentamos los valores de los coeficientes de transferencia, externo e interno, de masa y de la velocidad del fluido, temperatura y L/D .

En la primera tabla 5.2. se puede observar la influencia del L/D sobre los coeficientes, a velocidad superficial del aire y temperatura constantes. A menor valor de L/D ; esto es, a menor carga en el secador, el espacio vacío será mayor y por lo tanto, la velocidad superficial real será mayor mejorando la transferencia externa de masa. Recordemos que el coeficiente externo de transferencia de masa está en relación directa con el no. de Reynolds. Sin embargo, concluimos en este estudio que, el efecto del L/D sobre la transferencia externa de masa no es muy marcado, aún cuando el orden de magnitud se ve ligeramente afectado. En cuanto al coeficiente interno, a pesar de que se observa una tendencia a disminuir en los datos experimentales con

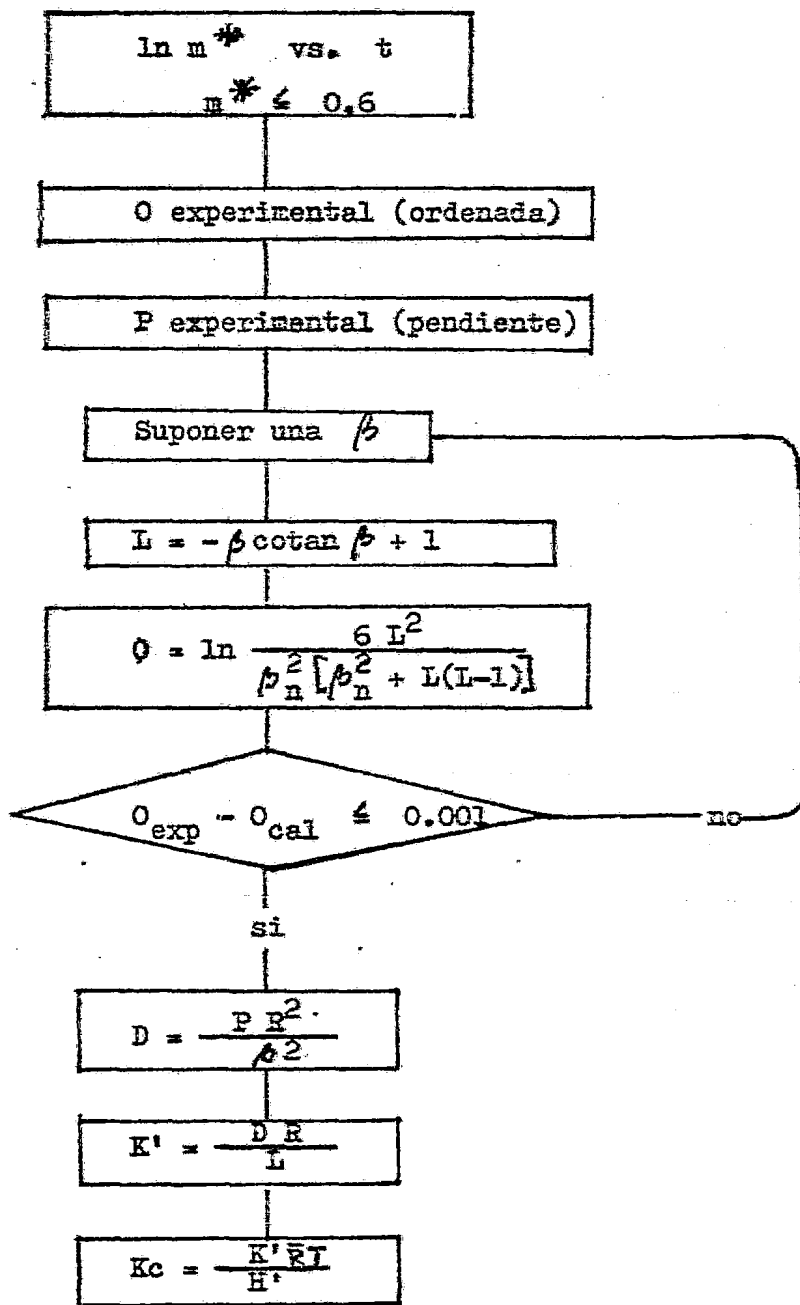


Fig. 5.32. Esquema del procedimiento de cálculo de los coeficientes de transferencia de masa.

aumento en el L/D , consideramos que el coeficiente de difusión permanecía constante, debido a que la variación de carga en el secador no puede influenciar el transporte interno de agua. Debemos pensar que la variación encontrada es propia del error experimental.

En la tabla 5.3. se muestra el efecto de la velocidad superficial de aire manteniendo constantes la temperatura y el L/D . En estos resultados se observa que no hay influencia sobre el coeficiente de difusión pues el valor del coeficiente permanece prácticamente constante. Por otra parte, el coeficiente externo de transferencia de masa, sí está severamente influenciado por la velocidad del fluido. A mayores velocidades superficiales de aire, el valor del coeficiente se incrementa, debido a la disminución de la resistencia al transporte.

Por último, en la tabla 5.4. mostramos los datos de los coeficientes a distintas temperaturas, para L/D y velocidad de fluido constantes. En este caso se ve que la temperatura sí ejerce una influencia significativa sobre la transferencia de masa. En ambos coeficientes, tanto el interno como el externo, se observa una diferencia en el orden de magnitud, incrementándose el valor de los coeficientes conforme la temperatura aumenta. En otras palabras, la resistencia a la transferencia de masa es menor a altas temperaturas de secado, por lo tanto el secado se lleva al cabo más rápidamente. Es posible decir que

Tabla 5.2. Efecto del L/D sobre los coeficientes de transferencia de masa a velocidad superficial de 30 280 cm/min y temperatura de 25°C.

L/D	β	L	D (cm ² /min)	Kc (cm/min)
0.5	2.7623	7.93013	8.60380 x 10 ⁻⁵	12.81643
0.5	2.7205	7.07412	9.47881 x 10 ⁻⁵	12.59573
1.0	2.7070	6.83165	7.77854 x 10 ⁻⁵	9.98207
1.0	2.8230	9.55900	6.84231 x 10 ⁻⁵	12.28606
1.0	2.7742	8.20821	5.69195 x 10 ⁻⁵	8.77619
1.5	2.7765	8.26398	4.84488 x 10 ⁻⁵	7.52089
1.5	2.7810	8.37510	4.66944 x 10 ⁻⁵	7.34572
2.0	2.7644	7.97797	3.97459 x 10 ⁻⁵	5.95638
2.0	2.6940	6.61145	3.98731 x 10 ⁻⁵	4.95194

Tabla 5.3. Efecto de la velocidad superficial del aire sobre los coeficientes de transferencia de masa a temperatura de 25°C y L/D de 1.

Va (cm/min)	β	L	D (cm ² /min)	Kc (cm/min)
20 185	2.30900	3.10073	6.45211 x 10 ⁻⁵	3.75806
20 185	2.31200	3.11617	6.20421 x 10 ⁻⁵	3.63165
30 280	2.70700	6.83165	7.77854 x 10 ⁻⁵	9.98207
30 280	2.82300	9.55900	6.84231 x 10 ⁻⁵	12.28606
30 280	2.77420	8.20821	5.69195 x 10 ⁻⁵	8.77619
35 325	2.99375	21.10820	6.83123 x 10 ⁻⁵	27.07794
35 325	3.01390	24.47434	6.70509 x 10 ⁻⁵	30.82569
45 420	3.07180	44.94174	8.66400 x 10 ⁻⁵	73.14181
45 420	3.07210	45.13536	9.35073 x 10 ⁻⁵	79.28106

Tabla 5.4. Efecto de la temperatura sobre los coeficientes de transferencia de masa a velocidad superficial de aire de 30 280 cm/min y L/D de 1.

T (°C)	β	L	D (cm ² /min)	Kc (cm/min)
25	2.70700	6.83165	7.77854 x 10 ⁻⁵	9.98207
25	2.82300	9.55900	6.84231 x 10 ⁻⁵	12.28606
25	2.77420	8.20821	5.69195 x 10 ⁻⁵	8.77619
40	2.81400	9.28043	7.05226 x 10 ⁻⁵	6.42413
40	2.80800	9.10287	8.48274 x 10 ⁻⁵	7.57935
50	3.02160	26.06570	1.10630 x 10 ⁻⁴	8.68444
50	2.92130	14.04579	1.03410 x 10 ⁻⁴	4.37432
50	3.02255	26.27043	8.42508 x 10 ⁻⁵	6.66562
65	3.01880	25.46085	1.42327 x 10 ⁻⁴	3.21696
65	3.06240	39.58938	1.34265 x 10 ⁻⁴	4.71877
65	3.09350	65.27415	1.15085 x 10 ⁻⁴	6.66878

usando condiciones de velocidad superficial y de temperatura altas se reducirán notablemente los tiempos de secado, pues es en estos casos cuando la resistencia a la transferencia de masa es menor.

El comportamiento del coeficiente interno de difusión con respecto a la temperatura se puede modelar siguiendo la ecuación de Arrhenius:

$$D = A' \exp - E_a/RT$$

Construyendo una gráfica del logaritmo natural del coeficiente interno de difusión contra el inverso de la temperatura absoluta obtuvimos una línea recta, como se muestra en la figura 5.33. El valor de la energía de activación (E_a) puede ser obtenido a partir de la pendiente de esta recta. Para el caso de semilla de uva se encontró que era de $- 3359.25 \text{ cal/mol}$.

5.5. Eficiencia térmica.

5.5.1. Efecto del plato distribuidor.

Por los datos experimentales presentados en el apéndice 6.4.1. y la figura 5.34., es posible decir que el efecto de entrada es independiente del tiempo, pasados los primeros minutos de inestabilidad, en los cuales se calienta el plato distribuidor y el resto del equipo, comportamiento descrito con anterioridad por Heertjes (1953) para sílica gel en un secador de leche fluidizado. Como se observa, un aumento en la velocidad del fluido se traduce en un efecto menor de entrada; el efecto

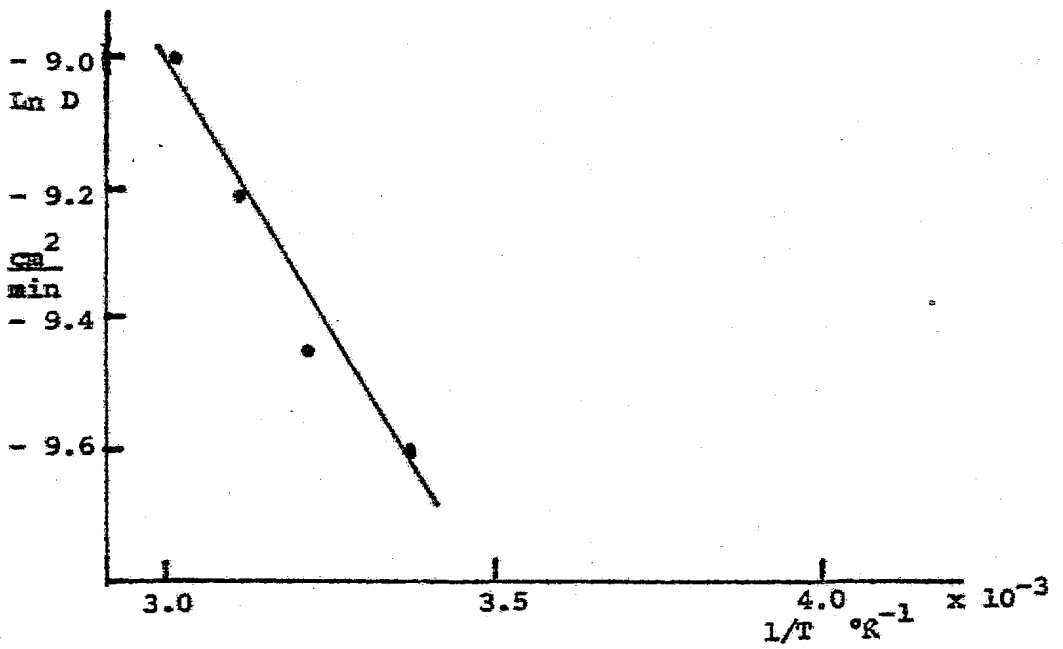


Fig. 5.33. Modelo de Arrhenius
Comportamiento de D con respecto a T.

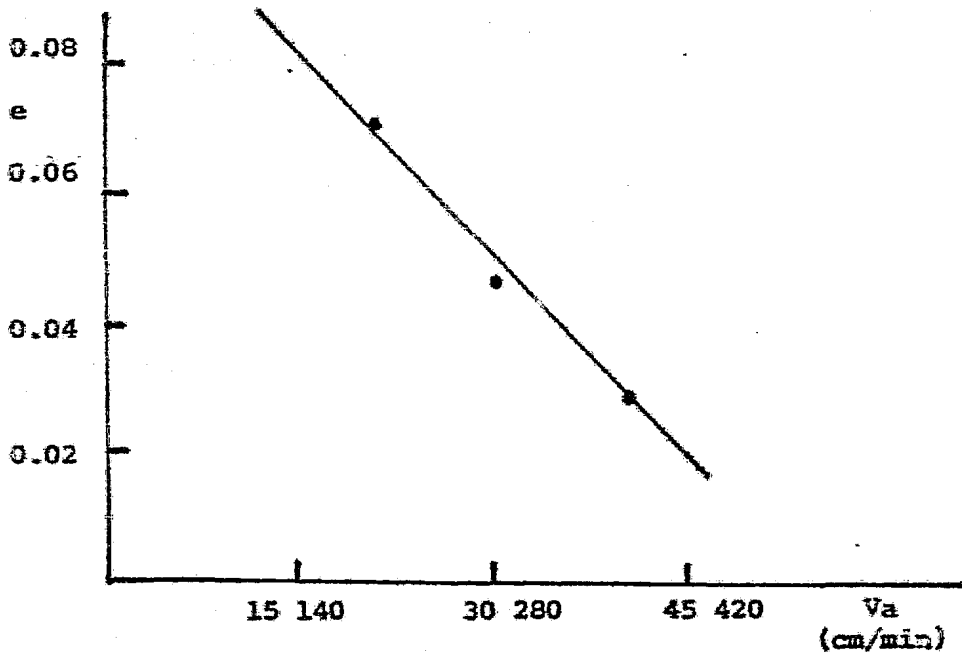


Fig. 5.34. Efecto del plato distribuidor
a distintas velocidades de fluido.

disminuye de 7 a 3 % con un aumento de gasto de aire de 8 a 16 m³/hr. De hecho las caídas de temperatura para los casos estudiados, a la temperatura máxima de trabajo, nunca fueron mayores a 3°C.

5.5.2. Temperatura en el lecho.

La temperatura de las partículas fluidizadas es ligeramente mayor a la temperatura de salida, una vez alcanzada la temperatura de secado. Como se muestra en el apéndice 6.4.1.

5.5.3. Temperatura en el aire del lecho fluidizado.

Con respecto a la temperatura del aire a diferentes alturas en el lecho, se observa que la caída de temperatura tiene lugar en la parte inferior del lecho. Esto es la caída de temperatura sigue un perfil logarítmico con respecto a la altura del lecho. Esta conducta se observa en el apéndice 6.4.1., donde se señalan los valores del efecto y las temperaturas a distintas alturas en el lecho fluidizado.

Estos resultados muestran que la diferencia de temperaturas, a la temperatura máxima de trabajo, 60°C, entre la parte inferior del lecho y la salida, no fue mayor a 2.6°C, lo que nos permite concluir que la medición de temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo a la salida del secador es una medida aproximada de las condiciones a las que el aire abandona el lecho fluidizado.

VI. CONCLUSIONES.

A continuación señalamos las conclusiones a las que llegamos en este trabajo. Para su mejor comprensión hemos querido presentarlas por temas, de manera que su lectura sea más accesible.

1.- Acerca del lavado del orujo ...

con el fin de evitar la pegajosidad del orujo durante su separación, este debe ser sujeto a un lavado previo, que en nuestro caso resultó ser el lavado ácido. Este tratamiento cumple dos funciones: por una parte degrada los carbohidratos residuales causantes de la eventual pegajosidad del material y por otra parte es empleado para extraer tartratos o antocianinas.

2.- Acerca de las isoterms de desorción ...

dieron y dan información sobre el contenido de humedad en el equilibrio para distintas condiciones de secado y de almacenamiento. Las isoterms obtenidas se comparan favorablemente con la isoterma de adsorción reportada en la literatura para semilla de uva. El análisis de estas gráficas permitió determinar el contenido de humedad de la monocapa, referencia necesaria para establecer las condiciones de secado y de almacenamiento. Además, mediante la ecuación de Claussius-Clapeyron se estimaron los calores de desorción, con los cuales se puede calcular la energía requerida para el secado en función del contenido de humedad del producto. Como se esperaba, a menores contenidos, mayor el calor de desorción requiriéndose mayor energía a medida que -

tiene lugar el secado.

3.- Acerca de la separación del hollejo y de la semilla ...

a partir de las velocidades mínimas de fluidización - de los distintos componentes se determinaron las condiciones de separación: la influencia de la velocidad del fluido, de la carga y de la temperatura en la fracción de sólidos separados y su contenido de humedad en función del tiempo. A mayor carga en el secador, la separación se lleva al cabo más lentamente. Por el contrario las altas velocidades del fluido favorecen la separación del hollejo de la semilla, siempre y cuando se trabaje a velocidades menores a la velocidad terminal de la semilla. Por último, la separación mostró ser prácticamente independiente de la temperatura, en las condiciones bajo estudio.

4.- Acerca del secado de la semilla ...

el análisis de las curvas del contenido de humedad -- contra el tiempo para distintas condiciones de carga, temperatura y velocidad del fluido, lo realizamos mediante la solución a la ecuación de Fick, de transporte molecular de líquido que incorpora la influencia de la resistencia externa a la transferencia de masa. Este modelamiento permitió evaluar los coeficientes de transferencia, tanto externo como interno, de masa. Los coeficientes de difusión interna tienen un orden de magnitud de 10^{-5} y 10^{-4} cm^2/min y su dependencia de la temperatura puede ser explicada en base al modelamiento de Arrhenius con una energía

de activación de $- 3\ 359$ cal/mol. El coeficiente de transporte externo depende moderadamente de la carga en el lecho y está se veramente influenciado por la velocidad superficial del aire.

En cuanto a la eficiencia térmica se encontró que des pues de una etapa inicial de estabilización del sistema, plato distribuidor, partículas fluidizadas y tubo del secador, la caí da de temperatura ocurre principalmente en la parte inferior -- del lecho. Finalmente la temperatura medida a la salida del sa cador es muy próxima a la temperatura de parte superior del le cho fluidizado y por lo tanto la posición de los termopares pa ra medir la temperatura a la salida del secador no nos conducen a un error.

5.- Acerca del uso del secador de lecho fluidizado...

el equipo empleado en este trabajo para estudiar las condiciones de separación y secado mostró ser muy adecuado para realizar ambas operaciones simultáneamente. Por lo cual este e quipo puede ser utilizado favorablemente para realizar las ope raciones de separación y de secado dentro del proceso de aprove chamiento integral del erujo de uva.

6.- Acerca de trabajos futuros ...

los datos, aquí evaluados, se pueden empiear para rea lizar el diseño del equipo a nivel planta piloto, en la cual se evaluarían los coeficientes de transferencia externa de masa, -- que permitirían un posterior escalamiento a nivel industrial.

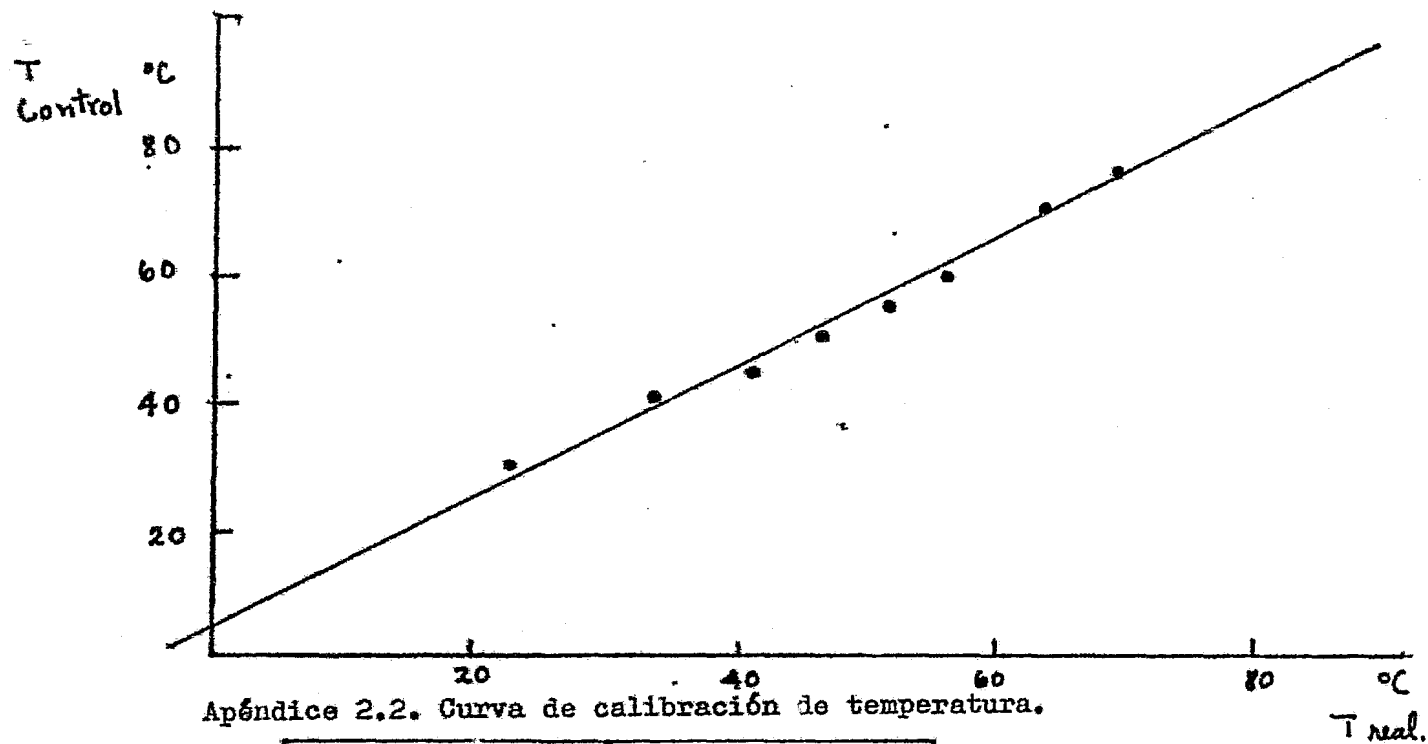
Además es necesario realizar una evaluación económica enmarcada dentro del proceso de aprovechamiento integral -- del orujo para ver la factibilidad y la rentabilidad de realizar todo el proceso con fines industriales de aprovechamiento de lo que hoy es un desecho.

APENDICES.

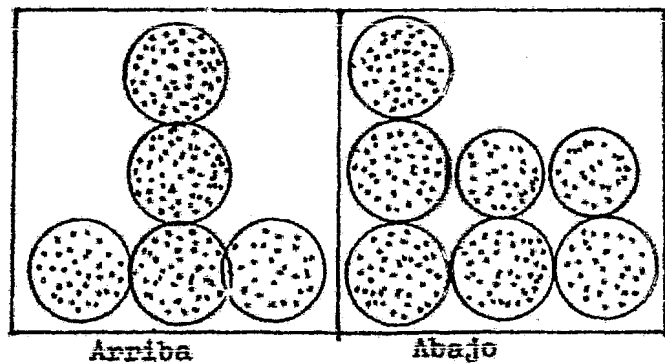
Apéndice 1. Tabla 1.1.1. β_n correspondientes a un L.


L	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
1	1.5708	4.7124	7.8540	10.9956	14.1372	17.2788
2	2.0288	4.9132	7.9787	11.0856	14.2075	17.3364
5	2.5704	5.3540	8.3029	11.3349	14.4080	17.5034
10	2.8363	5.7172	8.6587	11.6532	14.6870	17.7481
100	3.1102	6.2204	9.3309	12.4414	15.5522	18.6633
∞	3.1416	6.2832	9.4248	12.5664	15.7080	18.8496

Fuente: Crank, 1975.



Apéndice 2.2. Curva de calibración de temperatura.




 Zonas útiles de la estufa.

Apéndice 3.1.1. Datos de contenido de humedad en el equilibrio, actividad de agua, desviación - standart de los datos, contenido de humedad calculado por el modelo de Henderson coeficientes del modelo y temperatura de las isoterms.

T = 32°C = 305°K K = 12.9094 n = 0.9492			
m_{eq}	S.D.	a	m_{cal}
0.00624	0.0076	0.119	0.00766
0.03678	0.0020	0.329	0.02566
0.05749	0.0009	0.519	0.04862
0.09667	0.0011	0.759	0.09795
0.11461	0.0039	0.800	0.11152
0.12546	0.0056	0.900	0.16264
0.22369	0.0073	0.965	0.24160
T = 49°C = 322°K K = 7.19920 n = 0.64060			
m_{eq}	S.D.	a	m_{cal}
0.00139	0.0040	0.155	0.00172
0.01189	0.0079	0.316	0.01013
0.03015	0.0024	0.473	0.02290
0.08516	0.0065	0.748	0.07573
0.09764	0.0038	0.791	0.09238
0.11963	0.0068	0.853	0.12678
0.19930	0.0041	0.958	0.27793
T = 68°C = 341°K K = 8.91947 n = 0.68138			
m_{eq}	S.D.	a	m_{cal}
0.00144	0.0099	0.111	0.00174
0.00938	0.0059	0.303	0.00903
0.02498	0.0014	0.422	0.01668
0.07350	0.0023	0.732	0.06035
0.08300	0.0045	0.780	0.07408
0.11500	0.0086	0.950	0.20165

$$m = \frac{g H_2O}{g S.S.}$$

Apéndice 4.1.1. Datos de gasto de aire, velocidad superficial de aire, caída de presión (correspondiente al aumento o decremento de gasto) y altura del lecho para semilla húmeda $L/D = 1$.

Q (m ³ /hr)	Va (cm/min)	ΔP_L (cm H ₂ O)		Ha (cm)
		aumento	decremento	
2	5 050	0.50	0.40	3.0
3	7 570	1.45	0.55	3.0
4	10 095	2.15	0.67	3.0
5	12 620	2.66	1.16	3.0
6	15 140	3.05	1.33	3.0
7	17 665	3.65	1.53	3.0
8	20 185	2.47	1.60	3.0
9	22 710	1.80	1.25	3.7
10	25 235	1.77	1.18	4.3
11	27 755	1.65	1.10	5.1
12	30 280	1.45	1.17	6.3
13	32 800	1.40	1.20	7.8
14	35 325	1.20	1.20	9.8
15	37 850	1.20	1.20	11.9
16	40 375	1.20	1.20	15.7
17	42 900	1.20	1.20	20.3
18	45 420	1.20	1.20	25.4
19	47 945	1.20	1.20	30.6
20	50 470	1.20	1.20	36.6

Apéndice 4.1.2. Datos de gasto de aire, velocidad superficial de aire, caída de presión (corregido al aumento o decremento de gasto) y altura promedio del lecho para semilla seca $L/D = 1$.

Q (m ³ /hr)	Va (cm/min)	ΔP_L (cm H ₂ O)		Ha (cm)
		aumento	decremento	
2	5 050	0.60	0.47	3.0
3	7 570	1.00	0.76	3.0
4	10 095	1.33	0.95	3.0
5	12 620	1.60	1.16	3.0
6	15 140	2.00	1.48	3.0
7	17 665	2.40	2.10	3.0
8	20 185	2.30	2.03	3.5
9	22 710	2.30	1.90	4.3
10	25 235	2.16	1.89	5.2
11	27 755	2.23	1.83	6.3
12	30 280	2.20	1.83	8.1
13	32 800	1.90	1.90	11.0
14	35 325	1.90	1.90	14.7
15	37 850	1.90	1.90	18.8
16	40 375	1.90	1.90	23.0
17	42 900	1.90	1.90	27.5
18	45 420	1.90	1.90	32.0
19	47 945	1.90	1.90	38.1
20	50 470	1.90	1.90	45.0

Apéndice 4.1.3. Datos de gasto de aire, velocidad superficial de aire, caída de presión del lecho (correspondiente al aumento o decremento del gasto de aire) y altura del lecho para hollejo húmedo $L/D = 2$.

Q (m ³ /hr)	V _a (cm/min)	ΔP_L (cm H ₂ O)		H _a (cm)
		aumento	decremento	
2	5 050	1.32	1.00	2.9
3	7 570	1.86	1.65	2.9
4	10 095	3.03	2.50	2.9
5	12 620	4.57	2.65	2.9
6	15 140	5.06	2.80	2.9
7	17 665	5.93	2.96	2.9
8	20 185	6.26	3.74	2.9
9	22 710	6.70	4.50	2.9
10	25 235	7.50	5.00	4.0
11	27 755	7.65	5.00	7.0
12	30 280	7.77	6.47	10.5
13	32 800	6.47	6.47	15.5
14	35 325	6.47	6.47	20.0
15	37 850	6.47	6.47	23.5
16	40 375	6.47	6.47	24.5
17	42 900	6.47	6.47	29.0
18	45 420	6.47	6.47	34.0
19	47 945	6.47	6.47	39.0
20	50 470	6.47	6.47	44.5

Apéndice 4.1.4. Datos de gasto de aire, velocidad superficial de aire, caída de presión (correspondiente al aumento o decremento del gasto) y altura del lecho para hollejo seco $L/D = 2$.

q (m^3/hr)	V_a (cm/min)	ΔP_L (cm H_2O)		H_a (cm)
		aumento	decremento	
2.0	5 050	0.40	0.40	3.0
2.5	6 310	1.15	1.00	3.0
3.0	7 570	1.05	1.00	3.0
3.5	8 830	1.55	1.50	3.0
4.0	10 095	1.50	1.40	6.5
4.5	11 355	1.40	1.40	8.5
5.0	12 620	1.45	1.40	13.5
5.5	13 880	1.45	1.40	18.5
6.0	15 140	1.35	1.30	25.0
6.5	16 400	1.40	1.30	30.0
7.0	17 665	1.40	1.35	36.0
7.5	18 925	1.45	1.00	42.0
8.0	20 185	0.40	0.30	48.0

Nota: en ésta como en los anteriores apéndices la caída de presión (cm H_2O) es la lectura corregida restada de la caída de presión total.

Apéndice 4.2.1. Datos de fracción de sólidos en el lecho (referido solo hollejo) en base seca, tiempo y contenido de humedad en base seca de ambos componentes del orujo para $V_a = 30\ 280\ \text{cm/min}$ a 25°C .

L/D = 1			L/D = 2			L/D = 3			L/D = 4		
t	G	m	t	G	m	t	G	m	t	G	m
0	1.0000	1.4294	0	1.0000	1.3889	0	1.0000	1.2489	0	1.0000	1.4763
5	0.6868	0.3369	5	0.8947	0.4391	5	0.9798	0.6097	5	0.9855	0.9431
10	0.4294	0.2895	10	0.7021	0.2389	10	0.9368	0.4689	10	0.9506	0.5519
15	0.1379	0.2023	15	0.3978	0.1904	15	0.8020	0.2032	15	0.8687	0.3623
20	0.0000	0.1795	20	0.1677	0.1658	20	0.3962	0.1111	20	0.7239	0.2503
			25	0.0000	0.1320	25	0.2151	0.0939	25	0.5477	0.2198
						30	0.0000	0.0892	30	0.0774	0.1462
									35	0.0000	0.1274

$$t = \text{min}, \quad m = \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g S.S.}}$$

Apéndice 4.2.2. Datos de tiempo, fracción de sólidos en el lecho (referido a hollejo) en base seca y contenido de humedad en base seca para ambos componentes del orujo a $L/D = 2$ a 25°C .

Va = 20 185 cm/min			Va = 25 235 cm/min			Va = 35 325 cm/min			Va = 40 370 cm/min		
t	C	m	t	C	m	t	C	m	t	C	m
0	1.0000	1.4504	0	1.0000	1.3690	0	1.0000	1.2087	0	1.0000	1.1997
5	0.9929	1.1565	5	0.9751	0.3005	5	0.5428	0.1763	5	0.5033	0.2606
10	0.9634	0.7003	10	0.9214	0.2098	10	0.2093	0.1450	10	0.1694	0.1533
15	0.7470	0.2978	15	0.6857	0.1430	15	0.1108	0.1368	15	0.0000	0.0999
20	0.4199	0.2301	20	0.3710	0.1243	20	0.0000	0.1096			
25	0.1116	0.1963	25	0.0000	0.1004						
30	0.0000	0.1468									

$$t = \text{min}, \quad m = \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g S.S.}}$$

Apéndice 4.2.3. Datos de tiempo, fracción de sólidos sólidos en el lecho (tomando en cuenta solo hollejo) en base seca y contenido de humedad en base seca para - ambos componentes a $L/D = 2$ y $V_a = 30\ 280$ cm/min.

$T = 60^{\circ}\text{C}$		
t (min)	G	$m \left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g S.S.}} \right)$
0	1.0000	1.5008
5	0.7998	0.2436
10	0.7018	0.1803
15	0.3762	0.1212
20	0.1028	0.0824
25	0.0000	0.0797

$$C = \frac{\text{g sólidos iniciales} - \text{g sólidos arrastrados}}{\text{g de sólidos iniciales}}$$

$$C = \frac{\text{g sólidos en el lecho}}{\text{g sólidos iniciales}}$$

Apéndice 5.3.1. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$L/D = 0.5$, $V_a = 30\ 280$ cm/min y $T = 25^\circ\text{C}$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.84577	1.00000	0.82901
10	0.73748	0.86402	0.68263
20	0.59585	0.69251	0.56286
30	0.45565	0.52272	0.46488
45	0.34779	0.39211	0.35028
60	0.22350	0.24159	0.26546
80	0.15800	0.16227	0.18563
105	0.14870	0.15101	0.14679
140	0.12918	0.12737	0.10248
180	0.10338	0.09613	0.07373

$T_{\text{bs}} = 23.4^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 11.6^\circ\text{C}$, HR = 33.0 %, H = 0.0084 g H₂O/g a.s.
 $m_e = 0.024$ g H₂O/g S.S., D = 8.6038×10^{-5} cm²/min y
 Kc = 12.81643 cm/min

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.85097	1.00000	0.83577
10	0.71902	0.84044	0.68748
20	0.59821	0.69435	0.57051
30	0.45394	0.51990	0.46132
45	0.22843	0.38022	0.36456
60	0.30889	0.34450	0.28327
80	0.15965	0.16403	0.20423
105	0.12036	0.11652	0.13841
140	0.10343	0.09605	0.10545
180	0.09783	0.08928	0.08326

$T_{\text{bs}} = 22.5^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 12.3^\circ\text{C}$, H = 0.0096 g H₂O/g a.s. HR = 33.0 %
 $m_e = 0.024$ g H₂O/g S.S., D = 9.47881×10^{-5} cm²/min y
 Kc = 12.59573 cm/min.

Apéndice 5.3.2. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$L/D = 1.5$, $V_a = 30\ 280$ cm/min y $T = 25^\circ\text{C}$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.86600	1.00000	0.83701
10	0.80168	0.92361	0.77261
20	0.74622	0.85774	0.69696
30	0.62363	0.71215	0.60917
45	0.49247	0.55638	0.52046
65	0.37901	0.42163	0.41273
90	0.29216	0.31848	0.32015
120	0.22790	0.24216	0.24220
150	0.17650	0.18112	0.18106
180	0.15780	0.15892	0.13705

$T_{\text{bs}} = 23^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 11.0^\circ\text{C}$, HR = 30.8 %, H = 0.0098 g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ a.s.

$m_e = 0.024$ g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ S.S., $D = 4.84488 \times 10^{-5}$ cm^2/min

$K_c = 7.52089$ cm/min

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.87899	1.00000	0.84032
10	0.82320	0.93475	0.77959
20	0.76287	0.86419	0.70002
30	0.59359	0.66619	0.59987
45	0.48512	0.53933	0.51789
60	0.40480	0.44539	0.43510
90	0.27242	0.29055	0.31978
120	0.23162	0.24281	0.23760
150	0.19422	0.19909	0.18440
180	0.17371	0.17510	0.14210

$T_{\text{bs}} = 25.0^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 13.3^\circ\text{C}$, HR = 33.2 %, H = 0.0107 g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ a.s.

$m_e = 0.024$ g $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ S.S., $D = 4.66944 \times 10^{-5}$ cm^2/min y

$K_c = 7.34572$ cm/min.

Apéndice 5.3.3. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad resucido, contenido - calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$L/D = 2$, $V_a = 30\ 280\ \text{cm}^3/\text{min}$ y $T = 25^\circ\text{C}$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.85960	1.00000	0.85821
10	0.83549	0.95728	0.77960
20	0.78249	0.83895	0.72153
30	0.68996	0.79628	0.66122
45	0.57646	0.65890	0.56884
60	0.46455	0.51560	0.48951
80	0.37567	0.42955	0.40159
105	0.30769	0.34313	0.31466
140	0.23193	0.24604	0.22551
180	0.21970	0.23157	0.15658

$T_{\text{db}} = 23.0^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 14.2^\circ\text{C}$, $HR = 28.4\%$, $H = 0.0099\ \text{g H}_2\text{O/g a.s.}$

$m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$, $D = 3.97459 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 5.95638\ \text{cm}/\text{min}$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.86910	1.00000	0.86030
10	0.83300	0.97114	0.78241
20	0.75300	0.90772	0.72330
30	0.69694	0.79699	0.67116
45	0.58084	0.66115	0.57446
60	0.45973	0.52723	0.48031
80	0.38398	0.42086	0.39772
105	0.31701	0.33950	0.30998
135	0.24890	0.26930	0.24009
165	0.22230	0.23731	0.17787

$T_{\text{db}} = 24.0^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 8.0^\circ\text{C}$, $HR = 30.05\%$, $H = 0.0085\ \text{g H}_2\text{O/g a.s.}$

$m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$, $D = 3.98731 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 4.95194\ \text{cm}/\text{min}$.

Apéndice 5.3.4. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$V_a = 20\ 185\ \text{cm/min}$, $L/D = 1$ y $T = 25^\circ\text{C}$

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.84830	1.00000	0.82879
10	0.76675	0.90107	0.75969
20	0.72516	0.85061	0.69652
30	0.62036	0.72347	0.63878
45	0.55107	0.63942	0.56132
60	0.47301	0.54472	0.49363
85	0.39953	0.45557	0.39922
115	0.30055	0.33550	0.31063
140	0.26573	0.29325	0.25301
180	0.15275	0.15617	0.18392

$T_{\text{ds}} = 24.0^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 9.9^\circ\text{C}$, HR = 28.0 %, H = 0.0101 g $\text{H}_2\text{O/g}$ a.s.

$m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$, $D = 6.45211 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 3.75806\ \text{cm/min}$

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.83959	1.00000	0.82993
10	0.73220	0.86833	0.75616
20	0.70091	0.82996	0.68914
30	0.65595	0.75032	0.62825
45	0.54260	0.63586	0.54721
60	0.47796	0.55660	0.47704
80	0.38700	0.44508	0.39742
105	0.32394	0.36776	0.32492
140	0.24843	0.27518	0.24644
180	0.15094	0.15564	0.18148

$T_{\text{ds}} = 24.1^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 14.2^\circ\text{C}$, HR = 28.2 %, H = 0.0105 g $\text{H}_2\text{O/g}$ a.s.

$m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$, $D = 6.20421 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 3.63165\ \text{cm/min}$

Apéndice 5.3.5. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$V_a = 35\ 325\ \text{cm/min}$, $L/D = 1$ y $T = 25^\circ\text{C}$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.86123	1.00000	0.86683
10	0.71876	0.82912	0.68135
20	0.58162	0.66603	0.56434
30	0.48059	0.54536	0.45504
40	0.36842	0.41138	0.36785
50	0.29859	0.32797	0.29829
60	0.21049	0.22275	0.24281
80	0.15573	0.15734	0.16324
100	0.12321	0.11850	0.11260
120	0.10285	0.09418	0.09039
150	0.08075	0.06778	0.06762
180	0.06980	0.05471	0.05053

$T_{\text{bn}} = 23.5^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 8.2^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 29.5\ \%$, $H = 0.0075\ \text{g H}_2\text{O/g a.s.}$

$m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$, $D = 6.83123 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 27.07794\ \text{cm/min.}$

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.85420	1.00000	0.86732
10	0.71679	0.83449	0.67344
20	0.54389	0.62622	0.59798
30	0.48115	0.55065	0.48355
40	0.37522	0.42505	0.37008
50	0.30273	0.33574	0.30303
60	0.20744	0.22096	0.23822
80	0.16058	0.16451	0.16631
100	0.12010	0.11576	0.12508
120	0.10438	0.09682	0.08951
150	0.09023	0.07978	0.06357
180	0.06969	0.05003	0.04805

$T_{\text{bn}} = 24.0^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 8.0^\circ\text{C}$, $D = 6.70509 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 30.82569\ \text{cm/min}$

Apéndice 5.3.6. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$V_a = 45\ 420\ \text{cm/min}$, $L/D = 1$ y $T = 25^\circ\text{C}$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.85722	1.00000	0.86345
10	0.67506	0.78138	0.65112
15	0.55114	0.63265	0.57820
25	0.42825	0.48517	0.45002
35	0.27922	0.30631	0.34993
50	0.18974	0.19892	0.24108
75	0.10938	0.10247	0.12877
95	0.09874	0.08970	0.08808
120	0.06784	0.05262	0.06348
150	0.04880	0.02976	0.03917
180	0.03439	0.01247	0.03003

$T_{\text{bs}} = 22.6^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 11.6^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 33.8\ \%$, $H = 0.0117\ \text{g H}_2\text{O/g s.s.}$

$m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O/g s.s.}$, $D = 8.66400 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$
 $K_c = 73.14181\ \text{cm/min}$

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.84522	1.00300	0.85975
10	0.66184	0.77670	0.64568
20	0.52944	0.61608	0.50832
30	0.44545	0.51320	0.39919
40	0.30065	0.33688	0.31423
50	0.19265	0.20537	0.24031
60	0.18214	0.19257	0.18122
80	0.08678	0.07645	0.11672
100	0.06558	0.05063	0.08194
120	0.06197	0.04624	0.05988
150	0.05247	0.03457	0.04103
180	0.04119	0.02093	0.03214

$T_{\text{bs}} = 24^\circ\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 9.2^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 35.0\ \%$, $H = 0.0113\ \text{g H}_2\text{O/g s.s.}$

$m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O/g s.s.}$, $D = 9.35073 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$
 $K_c = 79.28106\ \text{cm/min}$

Apéndice 5.3.7. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$T = 25^{\circ}\text{C}$, $V_a = 30\ 280\ \text{cm}/\text{min}$ y $L/D = 1$.

t	M_{exp}	M	M_{cal}
0	0.85450	1.00000	0.85446
10	0.76220	0.88860	0.74010
20	0.66321	0.76972	0.62988
30	0.59433	0.68974	0.54129
40	0.48032	0.54944	0.46529
50	0.38066	0.42946	0.40110
60	0.28185	0.31040	0.33992
70	0.23300	0.25171	0.30010
80	0.21080	0.22490	0.26186
100	0.18340	0.19191	0.20659
120	0.16944	0.17033	0.15060

$T_{\text{bs}} = 25.0^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 12.2^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 31.4\ \%$, $H = 0.0111\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g a.s.}$

$m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g S.S.}$, $D = 7.77854 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 9.98207\ \text{cm}/\text{min}$

t	M_{exp}	M	M_{cal}
0	0.85220	1.00000	0.85513
10	0.75444	0.88191	0.73362
25	0.64582	0.75082	0.58384
40	0.48111	0.55190	0.46567
55	0.31655	0.35322	0.37245
70	0.29723	0.30384	0.29890
85	0.25173	0.27491	0.24987
100	0.18380	0.19292	0.19510
120	0.16454	0.16962	0.14873

$T_{\text{bs}} = 25^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 11.1^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 31.0\ \%$, $H = 0.0098\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g a.s.}$

$m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g S.S.}$, $D = 6.84231 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$,

$K_c = 12.28606\ \text{cm}/\text{min}$.

Apéndice 5.3.7. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$T = 25^{\circ}\text{C}$, $V_a = 30\ 280\ \text{cm}^3/\text{min}$ y $L/D = 1$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.84622	1.00000	0.84901
5	0.78322	0.92341	0.79234
10	0.72489	0.85255	0.73096
15	0.69981	0.82190	0.67970
25	0.63174	0.73911	0.58086
35	0.51909	0.60225	0.50199
45	0.47687	0.55080	0.42311
60	0.31910	0.34999	0.34597
80	0.24772	0.27210	0.25870
110	0.18663	0.19783	0.17009
140	0.16788	0.12754	0.11492
170	0.11729	0.11389	0.08059
200	0.10831	0.10255	0.05922
230	0.08390	0.07550	0.045592

$T_{\text{bs}} = 25.5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 9.1^{\circ}\text{C}$, $HR = 30.17\ \text{s}$, $m_e = 0.024\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$

$H = 0.0085\ \text{g H}_2\text{O/g aire seco}$, $D = 5.69195 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$,

$K_c = 8.77619\ \text{cm}/\text{min}$.

Apéndice 5.3.8. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y — coeficientes de transferencia de masa.

$T = 40^{\circ}\text{C}$, $V_a = 30\ 280\ \text{cm}/\text{min}$ y $L/D = 1$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.85120	1.00000	0.85538
15	0.72844	0.85368	0.65909
30	0.50030	0.58189	0.47937
45	0.35732	0.41151	0.36033
60	0.23181	0.26197	0.27160
75	0.17744	0.19715	0.20547
90	0.15093	0.16367	0.15618
105	0.13110	0.14198	0.11945
120	0.10083	0.10588	0.09207

$T_{\text{bs}} = 40.2$, $T_{\text{bh}} = 11.3^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 15\ \%$, $H = 0.0109\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g a.s.}$

$m_e = 0.01194\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g S.S.}$, $D = 7.05226 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 6.42413\ \text{cm}/\text{min.}$

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.84431	1.00000	0.85142
5	0.73844	0.87277	0.77484
10	0.69232	0.81739	0.70364
20	0.60171	0.70854	0.58056
35	0.41875	0.48868	0.43574
45	0.30472	0.35172	0.35552
60	0.19919	0.22487	0.26831
80	0.14050	0.15445	0.18741
100	0.10643	0.11348	0.13052
125	0.08788	0.09119	0.08459
150	0.08058	0.08249	0.05645
180	0.06711	0.06627	0.03666
210	0.04644	0.04140	0.02568
240	0.03440	0.02698	0.02257

$T_{\text{bs}} = 40.5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 10.4^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 14.8\ \%$, $H = 0.011\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g a.s.}$

$m_e = 0.01194\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g S.S.}$, $D = 8.48274 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$,

$K_c = 7.57935\ \text{cm}/\text{min.}$

Apéndice 5.3.9. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$T = 50^{\circ}\text{C}$, $V_a = 30\ 280\ \text{cm}/\text{min}$ y $L/D = 1$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.8503	1.00000	0.84042
15	0.5388	0.62982	0.55059
30	0.3582	0.41731	0.36114
45	0.2815	0.32706	0.23729
60	0.1168	0.13326	0.15634
75	0.1040	0.11820	0.10343
90	0.0903	0.10217	0.08337
105	0.0407	0.04371	0.06738
120	0.0314	0.03277	0.04375

$T_{\text{bs}} = 22.5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 12.0^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 8.0\ \%$, $H = 0.0588\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g a.s.}$

$m_e = 0.00355\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g S.S.}$, $D = 1.10630 \times 10^{-4}\ \text{cm}^2/\text{min}$,

$K_c = 8.68444\ \text{cm}/\text{min}$

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.8503	1.00000	0.84441
15	0.5481	0.64311	0.56088
30	0.3260	0.38081	0.36543
45	0.1578	0.18217	0.23103
60	0.0839	0.09489	0.15470
75	0.0792	0.08934	0.10627
90	0.0719	0.08072	0.08224
105	0.0672	0.07517	0.06883
120	0.0637	0.07104	0.04113

$T_{\text{bs}} = 23.9^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 14.2^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 8.2\ \%$, $H = 0.0105\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g a.s.}$

$m_e = 0.00355\ \text{g H}_2\text{O}/\text{g S.S.}$, $D = 1.0341 \times 10^{-4}\ \text{cm}^2/\text{min}$,

$K_c = 4.37432\ \text{cm}/\text{min}$.

Apéndice 5.3.9. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, — condiciones de secado y coeficientes de — transferencia de masa.

$T = 50^{\circ}\text{C}$, $V_a = 30\ 280\ \text{cm}^3/\text{min}$ y $L/D = 1$.

t	\bar{m}_{exp}	\bar{m}	\bar{m}_{cal}
0	0.8525	1.00000	0.84158
5	0.7522	0.89185	0.71192
10	0.6068	0.71058	0.62636
20	0.4425	0.51765	0.47684
30	0.3606	0.42058	0.36472
45	0.2242	0.25991	0.23896
60	0.1428	0.16403	0.15455
80	0.0905	0.10242	0.09387
100	0.0749	0.08413	0.07061
125	0.0604	0.06697	0.04037
150	0.0447	0.04847	0.03340
180	0.0389	0.04164	0.02564
210	0.0311	0.03245	0.01642
240	0.0203	0.01973	0.01160

$T_{\text{bs}} = 22.7^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 11^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 8.9\ \%$, $H = 0.0331\ \text{g H}_2\text{O/g a.s.}$

$m_e = 0.00355\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$, $D = 8.42508 \times 10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{min}$,
 $K_c = 6.66562\ \text{cm}/\text{min}$

Apéndice 5.3.10. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$T = 65^{\circ}\text{C}$, $V_a = 30\ 280\ \text{cm}^3/\text{min}$, y $L/D = 1$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.8523	1.00000	0.83645
15	0.4397	0.51533	0.43305
30	0.1804	0.21074	0.21862
45	0.0972	0.11306	0.13456
60	0.0539	0.06142	0.07297
75	0.0441	0.05071	0.05131
90	0.0343	0.03912	0.03188
105	0.0218	0.02443	0.01995
120	0.0167	0.01844	0.01265

$T_{\text{bs}} = 27.5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 9.9^{\circ}\text{C}$, $HR = 7.1\%$, $H = 0.0135\ \text{g H}_2\text{O/g a.s.}$

$m_e = 0.001\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$, $D = 1.42327 \times 10^{-4}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 3.21695\ \text{cm}^3/\text{min}$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.8318	1.00000	0.81978
15	0.4429	0.53193	0.43479
30	0.1691	0.20294	0.20687
45	0.0988	0.11772	0.11345
60	0.0535	0.06307	0.06382
75	0.0425	0.04971	0.05118
90	0.0342	0.04196	0.03892
120	0.0205	0.02579	0.02438
150	0.0160	0.01817	0.01851

$T_{\text{bs}} = 23.4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 10^{\circ}\text{C}$, $HR = 6.2\%$, $H = 0.0131\ \text{g H}_2\text{O/g a.s.}$

$m_e = 0.001\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$, $D = 1.54769 \times 10^{-4}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 4.71277\ \text{cm}^3/\text{min}$.

Apéndice 5.3.10. Datos de contenido de humedad experimental, contenido de humedad reducido, contenido de humedad calculado, tiempo, condiciones de secado y coeficientes de transferencia de masa.

$T = 65^{\circ}\text{C}$, $V_a = 30\ 280\ \text{cm}^3/\text{min}$ y $L/D = 1$.

t	m_{exp}	m	m_{cal}
0	0.8564	1.00000	0.85006
5	0.7565	0.88321	0.60509
10	0.6017	0.70224	0.51451
20	0.3371	0.39292	0.34347
30	0.1657	0.19254	0.21680
45	0.0778	0.08978	0.13379
60	0.0612	0.07038	0.07270
80	0.0434	0.04957	0.04526
100	0.0321	0.03636	0.02215
125	0.0183	0.02022	0.01659
150	0.0119	0.01274	0.00913
180	0.0070	0.00701	0.00707
210	0.0033	0.00269	0.00398
240	0.0015	0.00061	0.00165

$T_{\text{bs}} = 18.4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{bh}} = 13.3^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 5\ \%$, $H = 0.0076\ \text{g H}_2\text{O/g a.s.}$

$m_e = 0.001\ \text{g H}_2\text{O/g S.S.}$, $D = 1.15085 \times 10^{-4}\ \text{cm}^2/\text{min}$

$K_c = 6.66878\ \text{cm}/\text{min.}$

Apéndice 6. Ejemplo de cálculo de coeficientes de transferencia de masa.

De la figura 5.31. tenemos:

$$O = - 0.09113 \quad (\text{valor de la ordenada experimental})$$

$$P = - 0.00832 \text{ min}^{-1} \quad (\text{valor de la pendiente experimental})$$

Si suponemos una $\beta = 2.0288$, $L = 2$ entonces calculamos la ordenada de la siguiente forma:

$$O = \ln \frac{6 L^2}{\beta^2 [L^2 + L(L-1)]}$$

sustituyendo los valores de β y L tenemos:

$$O = \ln \frac{6 (2)^2}{(2.0288)^2 [(2.0288)^2 + (2)(2-1)]} = - 0.04775$$

si $\beta = 2.3$ y $L = 3.005501$ entonces $O = - 0.08874$

si $\beta = 2.312$ y $L = 3.116117$ entonces $O = - 0.09113$

por lo que $O_{\text{exp}} = O_{\text{cal}}$

Calculamos entonces D a partir del valor de la pendiente:

$$P = \frac{D \beta^2}{R^2} \quad \text{por lo que :}$$

$$D = \frac{0.00832 \text{ min}^{-1} (0.19965 \text{ cm})^2}{(2.312)^2}$$

$$D = 6.20421 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{min}$$

Si $L = K'R/D$ entonces $K' = LD/R$

$$K' = (3.11617) (6.20421 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{min}) / (0.19965 \text{ cm})$$

$$K' = 9.68363 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{min}$$

$$K_c = \frac{K'RT}{H'}$$

$$H' = \frac{P_a (18)}{(f_s) (m_e)}$$

$$P_a = 585 \text{ mm Hg} \times 1 \text{ atm}/760 \text{ mm Hg} = 0.77 \text{ atm}$$

$$H' = \frac{0.77 \text{ atm}(18 \text{ g H}_2\text{O/g mol})}{(0.024 \text{ g agua/g S.S.})(1.176 \text{ g S.S./cm}^3)}$$

$$H' = 6.52051 \text{ atm cm}^3/\text{g mol}$$

$$K_c = \frac{9.68363 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{min} \times 82.06 \frac{\text{cm}^3 \text{ atm}}{\text{g mol}^\circ\text{K}} \times 298^\circ\text{K}}{6.52051 \text{ atm cm}^3/\text{g mol}}$$

$$K_c = 3.63165 \text{ cm}^3/\text{min}$$

Este mismo cálculo se realizó con todas las condiciones de secado que se estudiaron.

Apéndice 6.4.1. Datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para determinar los efectos de entrada, del lecho y del aire en el lecho para conocer la eficiencia térmica del equipo.

1. Efecto de entrada.

V_a	T_a	T_p	T_b	e
20 185	61.03	60.87	58.57	0.07079
30 280	60.92	60.78	58.07	0.04912
40 375	60.43	60.33	57.04	0.02905

2. Temperatura del lecho.

t	T_a	T_l	T_b	e
10	59.08	51.69	45.12	0.52937
20	61.57	57.92	52.86	0.41906
30	60.10	59.14	56.62	0.27586
40	60.30	60.05	57.63	0.09506
50	60.49	60.23	57.71	0.09253
60	59.87	59.67	57.64	0.08968
80	60.39	60.16	57.68	0.08487
100	61.98	61.75	59.18	0.03214
120	58.91	58.76	56.73	0.07042
150	60.02	59.86	57.73	0.07143

3. Temperatura del aire del lecho.

H_i	T_a	T_l	T_b	e
0.05	60.75	60.61	57.91	0.0493
2.10	60.74	60.55	57.91	0.0704
4.15	60.75	60.51	57.91	0.0845
6.20	60.75	60.48	57.90	0.0951

BIBLIOGRAFIA.

- Amerine and Cruess, "Technology of wine making". The AVI Publishing Co. Inc. West Port, Connecticut, 1960.
- A.O.A.C., "Official and tentative methods of analysis", 11th. Edition. Washington D.C., 1969.
- Badui, D., S., "Química de los alimentos". Editorial Alhambra. México, 1981.
- Baxerres, J.L., Yow, Y.S. et Gibert, H., "Séchage de produits alimentaires en couche fluidisé". Informations - Chimie No. 228/229. Toulouse. Août-Septembre, 1982.
- Bernardini, E., "Tecnología de aceites y grasas". Editorial Alhambra. Barcelona, 1981.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W., ----- "Drying cereal grains". The AVI Publishing Co. Inc. West Port, Connecticut, 1974.
- Brunello, G., Peck, R.E. and Della Nina, G., "Drying of barley malt in the spouted bed dryer". Can. J. of Chem. Eng. Vol. 52. April 1974.
- Crank, "Mathematics of diffusion". Clarendon Oxford. 2nd. Edition, 1975.
- Del Cañizo, A., "El cultivo de la vid" III Congreso Nacional de fruticultura. Guadalajara, Jalisco. 1981.
- Fantozzi, P. and Betschart, A.A., "Development of grape seed protein". J. Am. Oil Chemists' Soc. Vol. 56. March, 1979.
- Guadarrama, G., M.B., "Industrialización de desechos de vinificación y evaluación sensorial de vinos cosechas 76' -81' ". Tesis. Facultad de Química. UNAM. 1983.
- Heertjes, P.M., Boer, H.G.J. and De Hass Van Dorsser, A.H., "Temperature and humidity measurements in a drying fluidized bed". Chem. Eng. Sci. Genie Chimique. Vol. 2. No. 3. June, 1953.
- Iglesias, H.A. and Chirife, J., "A model for describing

- the water sorption behavior of foods". J. of Food Sci. Vol. 41, 1976.
- Kinsella, J.E., "The grapeseed oil: a rich source of - linoleic acid". Food Tech. May, 1974.
 - Labuza, T.P., "Sorptions phenomena in foods" Food Tech. Vol. 22, No. 270. March, 1968.
 - Lang, K.W., Mc Cune, T.D. & Steinberg, M.P., "Aproximity equilibration cell for rapid determination of sorption isotherms". J. of Food Sci. Vol. 46, 1961.
 - Lequerica, J.L., Flors, A. & Cerni, R., "Estudio del secado de arroz sancochado por la técnica de fluidización". A.T.A. Vol. 14. No. 3. 1974.
 - Leva, M., "Fluidization", Mac. Graw Hill Book Co. New - York, 1959.
 - Matchett, J.K., Legail, R.R., Ninino, R.C. & Natter, J. K., "Tartrates from grape wastes". Ind. Eng. Chem. Vol. 36. 1944.
 - Matevier, R.P., Francis, F.G. & Clydesdale, F.M. "Solvent extraction of anthocyanins from wine pomace". J. of Food - Sci. Vol. 45, 1960.
 - Segurajauregui, A., J.S., "Cálculo de velocidades de secado en la deshidratación de alimentos sólidos". 4o. Cuaderno de Posgrado. Depto. de Alimentos. Facultad de Química. UNAM. 1982.
 - Sloan, Weelock & Tasao, Chem. Eng. Drying June, 1967.
 - Vizcarra, M., M.G.; "Construcción de un lecho fluidizado experimental: estudio del efecto de las variables de operación sobre su comportamiento". Tesis. Facultad de Química. UNAM. 1974.
 - Vogt, E., "Fabricación de los vinos". Ed. Acribia, Zaragoza, 1972.