Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DEL SECADO SOLAR POR ESTRATOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO MECANICO-ELECTRICISTA

P R E S E N T A N

ARTURO PALACIO PEREZ
ALEJANDRO RODRIGUEZ VALDEZ

MEXICO, D. F 1980

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

SUMARIO

El objetivo central de este estudio es la elaboración de un programa de computadora que simule el secado solar de granos en cualquier región. En el presente trabajo se seleccionó el maíz por su gran influencia en el aspecto económico del país. Se llevaron a cabo pruebas experimentales para determinar una propiedad física del grano llamada "difusividad aparente" y para validar el modelo matemático desarrollado. La difusividad aparente junto con el resto de las propiedades del grano, la cantidad de material a secar y las dimensiones de los calentadores solares, permiten realizar la simulación en computadora para predecir el tiempo necesario para secar dicho material y la capacidad del o los ventiladores requeridos.

I N D I C E

	NOMENCLATURA	vi
1.	INTRODUCCION	1
2.	PANORAMA DEL SECADO DE GRANOS	4
3.	ANALISIS BIBLIOGRAFICO	14
4.	FUNDAMENTOS TEORICOS	26
5.	SIMULACION EN COMPUTADORA	51
6.	METODO EXPERIMENTAL	64
7.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	74
8.	CORRELACION DE RESULTADOS	88
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
	REFERENCIAS	98
	FIGURAS	101
	APENDICES (Indice)	131

NOMENCLATURA

A	área, m^2
D	coeficiente de difusión, m^2hr^{-1}
D^a	coeficiente de difusión aparente, m^2hr^{-1}
G	gasto másico de aire, $kghr^{-1}$
H_b	radiación solar directa, kWm^{-2}
H_d	radiación solar difusa, kWm^{-2}
H_t	radiación solar total, kWm^{-2}
L	promedio de radiación total diaria, ly
Ld	longitud del día solar, hr
M	masa del producto, kg
M_s	masa del producto seco, kg
P	presión total, Nm^{-2}
P_v	presión parcial del vapor, Nm^{-2}
P_{vs}	presión de vapor saturado, Nm^{-2}
Q	energía, kJ
R	constante termodinámica del gas, $Jkg^{-1}K^{-1}$
R_b	factor de corrección de la radiación directa incidente
RH	relación de humedades
T	temperatura del aire, °C
TLM	temperatura logarítmica media
U	coeficiente de transferencia de calor, $kWm^{-2}K^{-1}$
V	volumen, m^3/diferencia de potencial, V (volts)
W	humedad específica del aire, kg_w/kg_a
X	humedad del producto en base seca, kg_w/kg_p
Y	humedad relativa del aire, decimal
c_a	calor específico del aire, $kJkg^{-1}K^{-1}$

c_p calor específico del producto, $kJkg^{-1}K^{-1}$

c_v calor específico del vapor, $kJkg^{-1}K^{-1}$

c_w calor específico del agua, $kJkg^{-1}K^{-1}$

d diámetro, m

f fracción de finos, decimal

g aceleración de la gravedad, ms^{-2}

h_{fg} calor latente del agua, $kJkg^{-1}$

h'_{fg} calor de desorción del agua, $kJkg^{-1}$

h_a coeficiente de transferencia de calor, $kWm^{-2}K^{-1}$

k conductividad térmica, $kWm^{-1}K^{-1}$

l longitud característica del grano, m.

$\dot{m}$ gasto másico, kgs^{-1}

n variable de valor entero/no. de día calendario

r coordenada en el espacio de la partícula, m

s ángulo de inclinación

t tiempo, hr

u velocidad, ms^{-1}

$\dot{V}$ caudal del aire, $m^3s^{-1}m^{-2}$ (por m^2 de cama de granos)

y coordenada en el espacio de la cama de granos, m

α absortancia

δ ángulo de declinación

ε porosidad de la cama de granos, decimal

η eficiencia, decimal

θ temperatura del grano/ángulo de incidencia

μ viscosidad dinámica, Nsm^{-2}

ρ_a densidad del aire, kgm^{-3}

ρ_p densidad del producto, kgm^{-3}

ϕ latitud

ω ángulo horario

Subíndices

a referido al aire

b barométrica

bs bulbo seco

bh bulbo húmedo

c referido al captador

cf convección forzada

cn convección natural

e equilibrio

f final/del fluído

M máximo

p referido al producto

s de superficie

t total

v referido al vapor

vs vapor saturado

w referido al agua

∞ referido al medio ambiente

0 valor inicial

1. INTRODUCCION

En este escrito se sintetiza el trabajo realizado durante los últimos cinco años por el Instituto de Ingeniería referente a la factibilidad del secado solar de productos agrícolas en México. Para complementar dicho esfuerzo se formuló un modelo matemático representativo del fenómeno. En este modelo se incluye por primera vez el concepto de "difusividad aparente", lo cual permite tener una mayor precisión en la predicción del proceso.

Dado que el maíz se seleccionó como material de trabajo para llevar a cabo las pruebas mencionadas, en el capítulo 2 se muestra un breve panorama de su importancia como elemento vital para la alimentación del pueblo (dentro de la economía del país). Así mismo se remarca la necesidad de implantar nuevas formas de secado y almacenamiento con el objeto de re-

ducir al mínimo posible las pérdidas de maíz que se tienen debido al mal planeamiento del proceso de producción. Al final del capítulo se hace hincapié en el uso de la alternativa solar como fuente de energía para realizar el secado del grano. Se hace una comparación entre esta alternativa y los sistemas convencionales que utilizan otro tipo de energía para llevar a cabo el proceso, señalando las ventajas y desventajas existentes entre ambos.

Referente al problema del secado, se realizó una revisión bibliográfica y posteriormente se hizo un estudio teórico del fenómeno tomando en cuenta los parámetros que lo gobiernan, capítulos 3 y 4. A partir de este estudio se elaboró un modelo matemático que, integrado en un programa de computadora, permite predecir el tiempo necesario para secar cierta cantidad de producto, la capacidad del o los ventiladores necesarios y además la distribución de humedad del grano en el secador en distintas horas del día y a diferentes profundidades de la cama en función del diseño del calentador solar, de tal manera que variando éste, se logren los resultados deseados. Este desarrollo se observa en el capítulo 5. Durante el proceso de cálculo, el programa determina la variación de las características psicrométricas del aire tanto al entrar al secador como en su paso a través de la cama de granos. La ecuación que determina el valor de la humedad del grano, incluye un parámetro que agrupa varias propiedades físicas del material a secar como lo son la difusividad del agua en el sólido y la variación de la longitud característica del producto. Estas propiedades por sí solas son difíciles de determinar y debido a ello se procedió a medir experimentalmente dicho parámetro llamado difusividad aparente, mediante el uso de un aparato de "calibración", el cual operado bajo con-

diciones controladas de laboratorio para evitar las intermitencias solares, permite medir el cambio de humedad en la cama de granos con el tiempo. Integrando estos datos al modelo matemático se obtuvo una ecuación que determina la relación entre la "difusividad aparente" y el contenido de humedad del producto. La secuencia seguida en el método experimental se describe en el capítulo 6.

En el siguiente capítulo se lleva a cabo la correlación de resultados para comprobar la validez del modelo matemático y finalmente se enuncia una serie de conclusiones y recomendaciones referentes al estudio completo.

2. PANORAMA DEL SECADO DE GRANOS

2.1 Generalidades

Uno de los Principales problemas a los que se enfrenta México y que parece agravarse cada vez más, es el bajo aprovechamiento de nuestros recursos agrícolas, lo cual ha hecho necesaria la importación de productos básicos para la alimentación de la población.

Anualmente se registran pérdidas que ascienden a varios millones de pesos debido a que se carece de técnicas adecuadas para el manejo de los productos una vez que han sido cosechados.

El maíz, considerado como el componente más importante dentro de la alimentación nacional, sufre las consecuencias de las deficiencias arriba

mencionadas. Dentro de los estratos sociales más bajos, representa aproximadamente el 16 por ciento del gasto familiar total y no menos del 25 por ciento del que es destinado para la alimentación.

En cuanto a la producción nacional total se encuentra que un 65 por ciento de la cosecha de maíz es destinado para consumo humano, 19 por ciento para consumo forrajero y el 16 por ciento restante para consumo industrial[9]. Su cultivo ocupa casi la mitad del territorio cultivado total, aunque produce sólo alrededor del 25 por ciento del valor de producción agrícola total. Un dato significativo de la ineficiencia del manejo del grano es que en 1974, de casi 12 mil millones de pesos de monto de la producción, se perdieron más de 1600 millones. Estas pérdidas fueron debidas en parte a deficiencias en el secado y almacenamiento del grano.

Para 1980 se espera importar un total de 7.1 millones de toneladas de grano, de las cuales 3 millones corresponden a maíz*.

El monto total de dicha importación será de 17259 millones de pesos.

---

* Excélsior, Sábado 19 de enero de 1980

La tabla 2.1.1 muestra la producción total de maíz en los últimos años**. Dicha producción resulta insuficiente para cubrir las necesidades de nuestro país[9], como se puede ver en la fig 2.1.1.

	1974	1975	1976	1977	1978
Maíz	7,848	8,449	8,017	10,174	10,909
Sorgo	3,499	4,126	4,027	4,273	4,185
Algodón	513	206	224	416	340
Trigo	2,788	2,798	3,363	2,456	2,643
Café	221	228	212	182	270
Caña de azúcar	33,499	32,368	31,387	30,390	30,000
Frijoles	972	1,027	740	762	940
Arroz	492	717	463	567	397

(Miles de toneladas)

TABLA 2.1.1 Producción agrícola en México. (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General de Economía Agrícola).

** Petróleos Mexicanos, $ 1,500,000,000 Syndicated Acceptance Facility editado por Bank of America NT & S.A, Agosto 1979.

Las técnicas de secado de las que se disponen no pueden aplicarse en regiones de clima húmedo (donde la productividad de la tierra es mayor) a pesar de ser económicas, efectivas y de fácil implementación.

Ejemplos de estas técnicas son el esparcimiento de los granos sobre superficies de cemento para secarlos por asoleamiento y el almacenamiento en trojes más o menos ventiladas que por procesos de convección natural secan el grano eventualmente. Si se dispusiese de técnicas más adecuadas tanto de secado como de almacenamiento, se evitarían gran parte de dichas pérdidas.

Un almacenaje correcto es de vital importancia debido a que el grano ya seco puede absorber nuevamente humedad cuando se encuentra sujeto a mala ventilación, lo cual favorece el desarrollo de plagas que destruyen cantidades considerables del grano. En muchas ocasiones para evitar tales consecuencias, se somete el grano a un nuevo secado. Si para ello el manejo no es adecuado, el resultado son fracturas y fisuras en el grano, los que a su vez lo hacen más susceptible al ataque de hongos e insectos. Para minimizar el manejo del grano es indispensable el diseño de almacenes que a su vez sean secadores y puedan mantener permanentemente el aire interior con bajos niveles de humedad.

El secado de grano es una actividad agrícola que requiere grandes cantidades de energía para su desarrollo, el cual se ve afectado día a día por la escasez de combustible fósil, que tras consigo una inevitable alza en los costos de operación.

Entre los combustibles más usados se cuentan el gas natural y el petróleo diáfano, aún cuando los aceites combustibles y la electricidad también entran en el panorama.

Cuando el secado se efectúa sobre capas de grano profundas, durante el proceso se utiliza aire a alta velocidad y temperatura. El secador debe ser entonces diseñado de forma que se logre una exposición óptima del grano al aire y fácil manejo del mismo. En este tipo de secado, el combustible fósil aporta entre el 90 y 95 por ciento de la energía total utilizada.

Existe otro proceso de secado llamado de temperatura baja, que se lleva a cabo durante largos períodos de tiempo cuando el grano se encuentra almacenado. Ya que los sistemas convencionales de secado por combustión resultan caros y complejos, se puede pensar en la utilización de la energía solar como fuente de calentamiento del aire de secado a baja temperatura.

El cuadro de la fig 2.12 presenta una comparación cualitativa entre los dos sistemas básicos de secado de granos (circulación forzada de aire frío (ambiente) y circulación forzada de aire calentado con combustible) con respecto al sistema solar con aire forzado[9].

Al realizar un breve análisis de dicho cuadro, se ve claramente que las múltiples ventajas que presenta la opción solar, la colocan como una inagotable fuente de energía aplicable en el secado de granos.

2.2 La energía solar en el secado de granos

El uso de la energía solar encuentra mayor aplicación en procesos de l
ja temperatura cuando el grano se encuentra almacenado, ya que se re
quiere de bajos niveles de calor en la entrada de aire durante largos
períodos de tiempo. Este método de secado tolera además la entrada d
niveles variables o intermitentes de calor, lo cual es muy importante
ya que la disponibilidad de la energía solar varía según la estación
del año, la situación geográfica y la orientación del colector solar.

En la mayor parte de las áreas de cosecha de maíz[13], la humedad relat
va del aire ambiente durante los períodos soleados, es lo suficientem
te baja para poder secar el grano a los niveles de humedad deseados,
sin que se necesite calor. Cuando dicha humedad es alta, un pequeño
mento de temperatura, de unos 5 a 10 grados C, reduce la humedad a va
res apropiados para el secado. Por ejemplo, si se tiene aire saturad
a 18 grados C, calentándolo 10 grados se puede reducir su humedad rel
tiva hasta aproximadamente 55 por ciento. Esta es una de las grandes
ventajas del calentamiento de aire con captadores solares, cuyo rendi
miento es mayor operando a bajas diferencias de temperatura entre el
biente y la placa, debido a que las pérdidas son menores.

Cuando se agrega calor solar durante el día, una operación contínua d
ventilador durante la noche cuando la humedad relativa del ambiente e
alta, ayuda a compensar el sobresecado del día y produce un secado un
forme a través de toda la masa de granos. Esto se puede considerar

como una ventaja, ya que no es necesario un almacén de energía, pues el grano actúa como tal. Por lo tanto debido a que el grano sobresecado absorbe agua del aire nocturno, éste reduce su humedad relativa de tal manera que el grano que se encuentra arriba de las capas sobresecadas, tiene posibilidad de seguirse secando. Sin embargo, no hay suficiente energía almacenada en el grano sobresecado como para que el proceso continúe durante largos períodos de mal clima. El sobresecado con aire caliente es peligroso sobre todo cuando la profundidad de la cama es considerable. En ese caso, el sobresecado ocurre en los estratos más cercanos a la entrada de aire. Por esta razón, no es deseable calentar el aire a temperaturas que bajen su humedad relativa a menos de un 30 por ciento cuando se realiza el secado en almacenes.

2.3 Qué es un colector solar

Un colector solar simple de tipo plano, está formado por un material absorbedor de energía y un material capaz de transmitir la energía de radiación; este último sirve generalmente como cubierta del colector (Ver fig 2.3.1).

El material absorbedor puede ser metal, papel o plástico cuando el fluido a calentar es aire, y su rendimiento es mayor cuando su acabado es rugoso y además se cubre de pintura negra mate, ya que eso ayuda a atrapar la radiación solar que incide en él. La cubierta debe transmitir la radiación de onda corta del sol. Por ello, el vidrio y algunos materiales plásticos son utilizados como cubiertas pues transmiten aproximadamente

un 90 por ciento de la energía del sol. Dicha cubierta es útil además porque reduce las pérdidas de calor causadas por convección del aire y por la emisión de radiación de onda larga del absorbedor.

La vida media de las cubiertas de plástico varía según la fracción de radiación que transmiten. Algunas pruebas[7] han demostrado que entre los plásticos más adecuados para este uso, se encuentran el polietileno y poliester para intemperie, fluoruro de polivinilo, acetato de celulosa y un compuesto de propileno, etileno y fluorocarbón. Otras cubiertas plásticas como el poliester, polietileno y cloruro de polivinilo se decoloran, se vuelven quebradizas y finalmente se rompen cuando se exponen al sol, por degradación de sus componentes causada por los rayos ultravioleta.

En colectores de aire, éste es forzado o inducido por uno o ambos lados del absorbedor. El calor se transfiere del absorbedor al aire cuando este pasa por debajo de la placa como se muestra en la fig 2.3.1.a, o cuando pasa entre la cubierta y la placa (fig 2.3.1.b).

Cuando se desea eliminar toda pérdida de calor, la parte trasera del colector y algunas veces los lados suelen aislarse.

2.4 Sistema de Secado Solar

Para diseñar un sistema de secado solar con aire forzado, el primer paso después de haber determinado la carga a secar, es encontrar el flujo de aire recomendable, la profundidad de la cama de granos, el máximo contenido de humedad del grano desecado y la caída de presión del aire al

pasar por la masa de granos. Estos valores varían con el tipo de grano y las condiciones del clima local en el momento de realizarse el secado. Estas recomendaciones pueden ser utilizadas para seleccionar el tipo de ventilador adecuado.

Combinando esa información se ha llegado a la conclusión de que el calentador de aire debería ser de un tamaño tal que el flujo de aire varíe entre 10 y 15 $ft^3/min\ ft^2$ (ref 4). Estos datos permiten calcular el área de la superficie absorbedora del colector, el cual formaría el techo del almacén secador.

El aire circula por convección forzada en el calentador solar y luego pasa por ductos a través del extremo opuesto hasta el entrepiso, de donde asciende entre el grano y una vez húmedo pasa al exterior. La fig 2.4.1 ilustra un almacén que funciona bajo este principio.

Un análisis teórico[4] ha indicado que para la misma caída de presión a través del colector, el diseño más eficiente sería aquél en el cual la entrada de aire fuera lo más ancha posible, comparada con la longitud de recorrido del aire.

Una comparación entre dos sistemas con la misma área de colección y la misma resistencia al paso de aire, pero con diferente configuración de longitud y ancho, muestra que el diseño propuesto arriba alcanza una mayor diferencia de temperatura logarítmica media entre el aire ambiente y la superficie del absorbedor, y por lo tanto una mayor transferencia de

calor y mejor eficiencia.

Otro tipo de almacén es aquel en el que el aire tiene acceso por ambos lados del techo y es removido por el centro a través de una abertura. Luego es forzado por un ventilador hacia la parte baja del amacén y circula por unos ductos laterales, de donde asciende hacia la cama de granos. Cuando el techo es de dos aguas (como en el caso de la fig 2.4.2) y está orientado al sur, el aire húmedo sale ya sea por unas ranuras o por la parte baja del techo norte.

2.5 Consideraciones económicas

El costo de un secador solar de granos excede por muy poco al de un secador de aire sin calentamiento. Dicho excedente vendrá dado por el costo del colector y algún probable diseño de ductos, pero estará compensado por el ahorro de cuando menos 50 por ciento de la energía utilizada en el ventilador, siendo sistemas más pequeños y de menor costo inicial debido a que el secado puede hacerse más rápidamente, y hay ahorro en la utilización de combustible.

Algunas pruebas han mostrado que el acoplamiento de un calentador solar de aire a secadores comunes reduce el tiempo de secado de un 50 a 75 por ciento[7].

Una estimación sobre la factibilidad económica puede hacerse fácilmente calculando los costos extras de construcción y los probables ahorros. Con base en ello, se ha determinado que el costo adicional del sistema se recobraría entre uno y cinco años de operación del mismo.

3. ANALISIS BIBLIOGRAFICO

3.1 Generalidades

La remoción de humedad de los granos y semillas es esencialmente un fenómeno físico de transferencia de calor y de transferencia de masa. El calor es necesario para evaporar la humedad que se encuentra sobre la superficie del producto, y luego se transfiere al medio exterior que es el aire que envuelve al producto. El secado es pues un proceso contínuo en el que ocurren cambios simultáneos de humedad y temperatura del grano y de humedad y temperatura del aire. Dicho fenómeno ha sido investigado desde que se reportaron los experimentos de secado de maíz con aire caliente en el Journal Courrier de Lafayette, Indiana en 1870. El conocimiento del fenómeno se remonta a tiempos muy antiguos[1]:

"... Es siempre un proceso de calentamiento o de enfriamiento que seca las cosas, pero el agente en los dos casos es el calor, ya sea externo o interno. Porque aún cuando las cosas se secan por enfriamiento, como un vestido, donde la humedad existe por separado, es el calor interno lo que lo seca. Se lleva la humedad en forma de vapor (si es que no hay mucha humedad) y es acarreada por el frío que lo rodea. Todo se seca entonces tal como lo hemos dicho, por un proceso de calentamiento o de enfriamiento, pero el agente siempre es el calor ya sea interno o externo que se lleva la humedad en forma de vapor. Por calor externo me refiero como cuando las cosas son hervidas; por calor interno, cuando el calor respira hacia afuera y se lleva la humedad consumiéndola. He ahí el secado..."

Aristóteles (ca. 384-322 A.C.)

De las investigaciones realizadas se han llegado a conocer los parámetros que gobiernan el fenómeno del secado, pero aún no se han podido definir las interacciones que existen entre dichos parámetros con exactitud.

Existen dos formas de estudiar el problema, un estudio empírico que analiza los perfiles de temperatura y de humedad preocupándose poco por los fenómenos básicos que los producen, y un estudio racional que analiza tales fenómenos a conciencia y que define los perfiles mencionados. Este segundo método también puede considerarse empírico pero a otro nivel, puesto que para caracterizar los fenómenos individuales es necesario emplear las técnicas de análisis empírico, es decir formulación de hipótesis, experimentación, análisis estadístico, etc. Puesto que el producto a secar, en el caso de los granos y semillas, es materia biológica no homogénea, en la cual hay variaciones de tamaño y

forma, los estudios empíricos describen con más precisión el proceso del secado de granos. Sin embargo, el estudio racional permitirá una mejor descripción y comprensión del sistema del secado. La dificultad del segundo método reside en que cuando se reune la información conocida de los fenómenos básicos que intervienen en el proceso, el resultado es un modelo matemático no lineal y bastante complejo que no se presta a una solución analítica o a una simulación por computadoras. Al hacer las simplificaciones que permiten su simulación, los resultados obtenidos son menos precisos que las predicciones obtenidas por modelos puramente empíricos. Hamdy y Barre (1970) lograron la integración de un modelo híbrido, analógico-digital, para simular el secado de una cama de granos[16]. Ingram (1976) simplificó dicha simulación desarrollando un modelo basado en una representación por series, sin tener que recurrir a métodos analógicos[17]. El propósito de este trabajo es llegar al desarrollo de un modelo de simulación basado en los fenómenos básicos de transferencia de calor y de masa para describir el comportamiento de los parámetros que gobiernan el proceso y así lograr una predicción aceptable del sistema en consideración.

3.2 Humedad de Equilibrio de los Granos

Para que los granos se humedezcan o se sequen al estar expuestos al aire ambiente, debe existir un gradiente que gobierne la transferencia de la masa de agua. Este gradiente es consecuencia de la diferencia de las presiones parciales del vapor de agua dentro del grano y del aire que lo rodea. Si la presión parcial del vapor de agua en el aire es mayor que

la presión de vapor de agua dentro del grano, el contenido de humedad del grano se incrementará. Lo opuesto ocurre cuando el gradiente de presiones parciales es inverso. El fenómeno higroscópico descrito es consecuencia de las propiedades termodinámicas del agua al estar en contacto con materia biológica como los granos. Se requiere entonces una presión de vapor menor para condensar la humedad en el aire que aquella cuando no está en contacto con grano de baja humedad. A medida que aumenta la humedad del grano se requieren mayores presiones de vapor para condensar el agua tendiendo a la presión de vapor saturado de la temperatura del sistema. La humedad de equilibrio del grano es pues aquella que se establece cuando el gradiente de presiones de vapor es nulo. La humedad relativa del aire que rodea al grano cuando se alcanza dicho equilibrio es la humedad relativa de equilibrio. Se idealiza este concepto al decir que el grano alcanza su humedad relativa de equilibrio durante un tiempo infinito.

Dada la importancia que juega la humedad de equilibrio en el secado de los granos, se ha llevado una extensa investigación experimental para determinar los valores correspondientes a diferentes humedades relativas, para diferentes tipos de granos. Al representar gráficamente la humedad de equilibrio con respecto a la humedad relativa para una temperatura del aire constante se encuentra una curva de tipo S donde la humedad de equilibrio aumenta rápidamente al pasar el 85 por ciento de humedad relativa. No existen datos muy precisos para humedades relativas arriba de este valor, pues se desarrollan hongos que alteran los valores medibles. El efecto de la temperatura del ai

re es significativo para estas curvas. Al aumentar la temperatura a humedad relativa constante, disminuye la humedad de equilibrio del grano. Rodríguez-Arías (1956) obtuvo las curvas de equilibrio para maíz para temperaturas entre 40°y 140°F (4.4° - 60°C)[3,24]. Diferentes modelos teóricos han sido desarrollados para calcular la humedad de equilibrio de los granos, pero ninguno ha podido predecirla con precisión para todos los rangos de temperatura y humedad relativa.

Strohman y Yoerger (1967) desarrollaron un modelo semi-teórico que correlaciona los datos experimentales de Rodríguez-Arías[24],

$$P_v/P_{vs} = \text{Exp}\ \{\ a\ e^{bX_e}\ \text{Ln}\ P_{vs} + c\ e^{dX_e}\ \} \qquad (3.2.1)$$

donde las constantes para el maíz son:

$$a = 0.8953, \quad b = 0.1232, \quad c = -5.482\ , \quad d = 0.1917$$

cuando las presiones están en libras por pulgada cuadrada (psi). Esta ecuación no es factible para la simulación matemática pues resulta imposible resolverla directamente para X_e. Generalmente se emplea la modificación de Thompson a la ecuación desarrollada por Henderson para el maíz[25],

$$1 - (P_v/P_{vs}) = \text{Exp}\ \{\ -3.82 \times 10^{-5}\ (T+50)\ \ X_e^{2}\ \} \qquad (3.2.2)$$

donde T está en °F. Los resultados de esta ecuación son siempre un

poco mayores a los datos de Rodríguez-Arías. De datos experimentales obtenidos por Ramírez Genel (1966) se obtuvieron las expresiones siguientes[19]:

$$X_e = 0.1407 \quad Y \quad + 4.1778 \quad \text{para} \quad Y \leq 85 \text{ por ciento} \qquad (3.2.3)$$

$$X_e = 0.564 \quad Y \quad - 31.8 \quad \text{para} \quad Y > 85 \text{ por ciento}$$

Aunque no se considera la temperatura para estas ecuaciones, se observa en la figura 3.2.1 que representan un buen promedio para los datos de Rodríguez-Arías. Cabe hacer notar que la humedad de equilibrio discutida arriba, es válida para un proceso de desorción. Para un proceso de adsorción los valores de X_e serán por lo general uno por ciento menores debido a un efecto de histéresis.

El calor latente de vaporización de agua contenida en el grano es generalmente mayor que el calor latente del agua libre.

Cuando la humedad y la temperatura del grano son altas, el calor latente del grano es similar al del agua libre. Para un contenido de agua bajo y temperatura baja será más difícil evaporar la humedad y en consecuencia el calor latente del agua en el grano será mayor. Thompson et al (1968) determinaron la expresión[25],

$$h'_{fg} = h_{fg} \left(1 + 4.35 \quad \text{Exp} \quad (-28.25 \; X) \right) \qquad (3.2.4)$$

El calor latente del agua también varía con la temperatura[2],

$$h_{fg} = 2502.7 - 2.38\ T \quad kJ/kg \tag{3.2.5}$$

Se determina entonces una expresión del calor latente de vaporización del agua contenida en el grano en función de la temperatura y humedad del mismo con las expresiones anteriores.

3.3 Teoría de la Difusión

Para poder realizar un estudio del secado de una masa de granos, debe determinarse cómo se secan los granos individualmente. Se logra dicho estudio al analizar el secado de una capa delgada de granos; es decir, cuando la proporción de masa de aire a masa de granos es tal que la evaporación de la humedad de los granos causa un cambio despreciable en las condiciones psicrométricas del aire. Una vez determinado el modelo de la capa delgada, se aplica al secado de una masa profunda de granos. Se divide la masa de granos en una serie de capas delgadas o estratos, y se calcula la cantidad de humedad que se remueve de cada estrato durante un incremento de tiempo, ajustando las condiciones psicrométricas del aire al pasar de un estrato al otro. Se ha determinado experimentalmente[5] que las variaciones de velocidad del aire de secado no afectan la rapidez de secado de una capa delgada de granos. Se concluye entonces que toda resistencia a la remoción de humedad reside en el interior del grano y no en su superficie. Lo último sólo ocurre cuando las humedades iniciales están por encima

de 70 a 75 por ciento (b.h.)* cuando los granos han sido cosechados antes de alcanzar su madurez fisiológica, o bien cuando se ha condensado agua sobre su superficie. El proceso exhibe entonces una rapidez de secado constante. Cuando la difusión de humedad limita el movimiento del agua dentro de cada grano, la rapidez de secado es decreciente.

Varios mecanismos han sido propuestos para describir el movimiento de la humedad en materiales porosos higroscópicos[3]:

Flujo capilar, que es el movimiento de líquido debido a las fuerzas de superficie;

Difusión líquida, que es el movimiento de agua debido a las diferencias de concentración de humedad;

Difusión superficial, que es el movimiento de agua debido a la difusión de humedad en la superficie de los poros;

Difusión de vapor, que es el movimiento de vapor de agua debido a diferencias de concentración de humedad;

Difusión térmica, que es el movimiento de vapor de agua debido a diferencias de temperatura;

Flujo hidrodinámico, que es el movimiento de vapor y de agua debido a diferencias de la presión total.

Luikov desarrolló un modelo matemático que describe las variaciones de la humedad, la temperatura y la presión basándose en los mecanismos descritos, y considerando sus interacciones. Se comprueban experimentalmen

---

*Nota: (b.h.) significa "base húmeda"; (b.s.) significa "base seca".

te las siguientes aseveraciones:

Los gradientes de la presión total son significativos sólo a temperaturas muy altas;

Las interacciones entre la humedad y la temperatura no producen efectos significativos para la mayoría de los granos;

Los gradientes de temperatura dentro del grano se pueden ignorar en un análisis práctico del secado.

Se reduce entonces el modelo de Luikov a la expresión,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 DX \qquad (3.3.1)$$

Al considerar el coeficiente de difusión D independiente de la posición,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left\{ \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right\}$$

donde c = 0 para una simetría planar, c = 1 para una simetría cilíndrica y c = 2 para una simetría esférica. Para resolver esta ecuación es necesario suponer las condiciones de frontera en las geometrías descritas,

$$\begin{aligned} X(r,o) &= X_c \\ X(r_o,t) &= X_e \end{aligned} \qquad (3.3.3)$$

donde r_o es la distancia del centro del cuerpo considerado a la superficie del mismo.

La solución analítica a la ecuación de difusión se expresa por[6],

$$RH = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \; Exp \left\{ - \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} \varphi^2 \right\} \qquad (3.3.4)$$

para un plano infinito, y

$$RH = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \; Exp \left\{ - \frac{n^2 \pi^2}{9} \varphi^2 \right\} \qquad (3.3.5)$$

para una esfera, donde RH es la relación de humedades que existe al tiempo t dada por,

$$RH = \frac{X_t - X_\infty}{X_o - X_\infty}$$

y con

$$\varphi = \frac{A}{V} (Dt)^{1/2}$$

donde A es el área superficial y V el volumen del cuerpo. Para un plano, o placa delgada V/A = espesor/2; y para una esfera se tiene, V/A = radio/3.

Se comprueba que RH es exacto dentro de un 0.1 por ciento para seis términos de la sumatoria[9].

Chittenden y Hustrulid (1966) correlacionaron datos experimentales con el modelo de simetría esférica, y concluyeron que el coeficiente de difusión D calculado bajo un criterio de constancia durante el proceso de secado, depende de la humedad inicial X_o y de la temperatura del aire de secado, aumentando dicho coeficiente al incrementarse los parámetros de humedad inicial y temperatura de secado. Infieren una dependencia de el coeficiente de difusión con respecto a la humedad puntual dentro del grano, y suponen su valor como dos veces mayor que el encontrado para la

capa delgada, puesto que D representa un valor medio[5]. El valor del coeficiente de difusión obtenido de un análisis de las curvas de secado depende también de la forma supuesta de las partículas que son los granos. Al considerar los granos de maíz como bloques, el coeficiente de difusión obtenido es 2.4 veces mayor que aquél derivado para una simetría esférica[17]. Existen dos razones por las cuales las predicciones que se basan en la teoría de la difusión no son precisas:

- Las condiciones de frontera no son correctas;
- El suponer el coeficiente de difusión constante durante el proceso de secado es impreciso.

La condición $X(r_o, t) = X_e$ implica que la humedad superficial alcanza la humedad de equilibrio instantáneamente. Pero existe un coeficiente de transferencia de masa para el fenómeno de convección que se lleva a cabo con el aire que circula sobre el grano. Este coeficiente no es infinito sino es de tal manera que la humedad de superficie tiende a X_e exponencialmente con el tiempo. La segunda razón es todavía más crítica, pues D gobierna totalmente la variación de la humedad del grano. Chu y Hustrulid (1968) determinaron la dependencia de la difusividad con la temperatura y con la humedad promedio del grano de maíz para un rango de temperaturas de 120° a 160°F, y humedades iniciales entre 25 y 36 por ciento (b.h.)[3],

$$D = 0.0012 \text{ Exp } \{(0.000256 + 0.1072)\ 100\ \bar{X}\ \frac{443.0}{\theta + 524}\ , \qquad (3.3.6)$$

donde θ es la temperatura del grano en °F y $\bar{X}$ es la humedad promedio del grano.

Puesto que el análisis de secado para una cama de granos no se presta a la definición de la difusividad para los granos independientes sino más bien para el conjunto de los estratos considerados, resulta conveniente definir una difusividad aparente D^* la cual represente el comportamiento del conjunto durante períodos cortos de tiempo y para una determinada humedad promedio de la cama. Del procedimiento experimental se concluye que existe una disminución considerable del volumen de los granos individuales, y en consecuencia de la relación (volumen/área) en la expresión de τ. Pero dichas variaciones de volumen así como la incertidumbre en la evaluación de X_e se consideran al ajustar D^* con los datos experimentales. Obviamente, los valores de D^* serán válidos sólo para los rangos de temperatura y humedad para los cuales fueron evaluados experimentalmente.

4. FUNDAMENTOS TEORICOS

4.1 Determinación del Modelo Matemático

Para analizar el secado de una masa de granos, se considera una capa delgada de maíz de área unitaria y de espesor Δy por la cual se hace pasar aire de secado durante un intervalo de tiempo $(t, t + \Delta t)$. Se definen entonces los parámetros del secado que son la humedad y temperatura del grano, y la humedad y temperatura del aire:

	Condiciones del maíz	Condiciones del aire
Antes del secado	X, θ	W, T
Después del secado	$X - \Delta X$, $\theta + \Delta\theta$	$W + \Delta W$, $T - \Delta T$

Puesto que los cuatro parámetros varían en el tiempo, es necesario efectuar cuatro balances para los cuales se hacen las siguientes simplificaciones:

- El flujo de aire es unidimensional
- No hay pérdidas de calor en la dirección perpendicular al flujo de aire
- La difusión de humedad y calor debida a los gradientes de concentración en el aire son despreciables
- La transferencia directa de calor y humedad entre las partículas es despreciable
- El espesor de la capa de granos permanece constante
- El calor necesario para evaporar la humedad y llevarla a la temperatura del aire, lo cede el grano y proviene del calor sensible del aire.
- Al cambiar una variable sobre el incremento de espacio o tiempo, dicho incremento es tal que los incrementos simultáneos de las demás variables son despreciables. El calor latente para la desorción es tal que,

$$h'_{fg} = h'_{fg}\,(X,T)$$

De las simplificaciones se puede deducir que las variables de estado serán función sólo de (y,t).

4.1.1 Conservación de la humedad

La humedad que sale del estrato menos la que entra es igual a la humedad que libera el grano menos la que se acumula en el aire, esto es:

$$G\Delta t\,\{W(y+\Delta y,t) - W(y,t)\} = -\rho_p\,\Delta y\,\{X(y,t+\Delta t) - X(y,t)\}$$
$$-\varepsilon\rho_a\,\Delta y\,\{W(y,t+\Delta t) - W(y,t)\}$$

En el límite cuando $\begin{matrix}\Delta y\to 0\\ \Delta t\to 0\end{matrix}$ se obtiene al desarrollar en serie de Taylor de primer orden en Δy o bien Δt,

$$G\frac{\partial W}{\partial y} = -\rho_p\frac{\partial X}{\partial t} - \varepsilon\rho_a\frac{\partial W}{\partial t} \qquad (4.1.1)$$

4.1.2 Cambio de entalpía del aire

La diferencia de energía entre la que entra y sale del estrato caliente al grano por convección, calienta la humedad evaporada a la temperatura del aire y se acumula en el estrato:

$$G\Delta t(c_a+c_vW)\,\{T(y+\Delta y,t) - T(y,t)\} = -h_a\,(T-\theta)\,\Delta t\,\Delta y$$
$$+\rho_p\,\Delta y\,c_v(T-\theta)\,\{X(y,t+\Delta t) - X(y,t)\}$$
$$-\varepsilon\rho_a\,\Delta y\,(c_a+c_vW)\,\{T(y,t+\Delta t) - T(y,t)\}$$

En el límite,

$$G(c_a+c_v W)\frac{\partial T}{\partial y} = -h_a(T-\theta) + \rho_p c_v(T-\theta)\frac{\partial X}{\partial t} - c\rho_a(c_a+c_v W)\frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1.2)$$

4.1.3. Cambio de entalpía del grano

El cambio de entalpía del grano se debe al calor que gana por transferencia de calor por convección y al que pierde al evaporar la humedad:

$$\rho_p\,(c_p+c_w\overline{X})\,\Delta y\,\{\,\theta(y,t+\Delta t)-\theta(y,t)\,\} = h_a(T-\theta)\,\Delta y\,\Delta t$$
$$+\,h'_{fg}\rho_p\Delta y\quad\{\,X(y,t+\Delta t)\;-\;X(y,t)\,\}$$

En el límite,

$$\rho_p(c_p+c_w\overline{X})\;\frac{\partial\theta}{\partial t} = h_a\,(T-\theta) + h'_{fg}\,\rho_p\,\frac{\partial X}{\partial t} \quad (4.1.3)$$

4.1.4 Cambio de humedad del grano

Se selecciona la ecuación diferencial de difusión considerando al grano de maíz como un bloque:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D\,\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \quad (4.1.4)$$

De investigaciones realizadas[3,1] se concluye que $\frac{\partial T}{\partial t}$ y $\frac{\partial W}{\partial t}$ son despreciables al compararlas con $\frac{\partial T}{\partial y}$ y $\frac{\partial W}{\partial y}$. En condiciones de secado, la constante de tiempo de la respuesta al cambio de temperatura en maíz húmedo es de 0.4 minutos comparada con 160 minutos de la respuesta al cambio de

la humedad; es decir, el grano alcanza el equilibrio térmico en el 0.25 por ciento del tiempo para un cambio de humedad, y por lo tanto no habrá un gradiente de temperatura dentro del grano[14]. Al exponer una capa delgada de grano caliente a un gasto relativamente grande de aire frío, el grano se enfría 0.9 (θ-T) en 48 s[15]. De lo anterior se puede inferir que para un incremento apropiado del tiempo, la temperatura del grano y la temperatura del aire es la misma. En consecuencia, las ecuaciones diferenciales que gobiernan el proceso de secado se reducen a,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \qquad (4.1.5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = - \frac{\rho_p}{G} \frac{\partial X}{\partial t}$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = h'_{fg} \frac{\rho_p}{G(c_a - c_v W)} \frac{\partial X}{\partial t}$$

En la última expresión se puede despreciar $c_v W$ con respecto a c_a.

No es posible alcanzar una solución analítica para el sistema de ecuaciones diferenciales y por lo tanto se efectúa el cálculo de la solución por una representación de diferencias finitas empleando técnicas de métodos numéricos. Se ha implantado un programa de computadora determinando los valores de las variables de estado en incrementos de Δt para nodos separados en Δy, el espesor de cada estrato. La representación por diferencias finitas consiste en reemplazar la derivada parcial por una aproximación que considera constante el gradiente de la variable dependiente sobre el incremento correspondiente Δt o Δy. T_i representa el valor de la temperatura a una distancia $i\Delta y$ de la entrada a la cama de granos;

sobre el intervalo $(i\Delta y, (i+1)\ \Delta y)$, se substituye $\partial T/\partial y$ por $(T_{i+1} - T_i)/\Delta y$. El lado derecho de la ecuación se considera constante y se resuelve para T_{i+1}. Se procede de igual manera para $\partial W/\partial y$. Los incrementos de X se obtienen de la ecuación de difusión para un plano infinito:

$$\frac{X_t - X_\infty}{X_o - X_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{5} \frac{1}{(2n+1)^2} \text{Exp} \left\{ - \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \quad Dt \right\}$$

Considerando incrementos del tiempo Δt,

$$\frac{X(y,t)-X_e}{X(y,t-\Delta t)-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{6} \frac{1}{(2n-1)^2} \text{Exp} \left\{ - \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4l^2} \ D\ \Delta t \right\} \quad (4.1.6)$$

La inconveniencia de este procedimiento reside en que se llegan a predecir humedades relativas mayores de 100 por ciento debido a los cálculos independientes de temperatura y de humedad específica del aire. Una solución al problema es efectuar un balance de energía adicional para simular la condensación del vapor de agua sobre los granos, y por medio de una ecuación de absorción determinar el incremento de humedad del grano. Otra manera de atacar el problema es derivar una ecuación diferencial de la expresión de la humedad de equilibrio X_e, la cual no está definida para valores mayores de 100 por ciento de la humedad relativa, e implantarla en el sistema de ecuaciones diferenciales. En el programa desarrollado, cuando se dá el caso de $Y > 1$, se determina un nuevo valor de $X(y, t+\Delta t)$ tal que ΔX determine una humedad relativa de 100 por ciento. Dicho procedimiento quizá no represente estrictamente la realidad física, pues se ha observado que ocurre la condensación del vapor de

agua sobre el grano el cual se humidifica. Pero al no haber sido detectado experimentalmente dicho fenómeno y puesto que no se cuenta con un modelo matemático que simule la rehumidificación del grano, se podrá ignorar la rehumidificación en primera instancia, eliminando también un problema de cómputo.

4.2 Características Psicrométricas

De la ecuación diferencial de la temperatura, $\partial T/\partial v$, se desprende que idealmente el proceso de secado es adiabático, y por lo tanto las variaciones en las características del aire de secado se podrán representar en una carta psicrométrica. Cuando se calienta el aire al pasar por un colector solar, se incrementa el calor sensible del mismo manteniéndose constante la humedad específica W. Subsecuentemente, al pasar por la cama de granos, el calor sensible disminuye pero aumenta el calor latente de tal manera que la entalpía del aire permanece constante. El modelo de difusión es válido cuando se consideran invariables las características del aire. Por lo tanto es necesario escoger un incremento de tiempo y un espesor de cada estrato apropiados, y determinar las nuevas características del aire al pasar de estrato a estrato. Los trabajos realizados indican que espesores de 2.5 cm e incrementos de 1 hora dan una precisión de resultados adecuada[1]. Para determinar las características variables durante el proceso de secado, es necesario contar con un modelo matemático de los procesos que describe la carta psicrométrica. Brooker (1967) ha desarrollado tal modelo[2], el cual proporciona valores aproximados muy cercanos a los que se encuentran en las cartas psicrométricas estándar las cuales se basan en las leyes de la mecánica estadís-

tica y de la termodinámica. En el apéndice A3 se describe el desarrollo de las expresiones utilizadas en la simulación de los parámetros de la carta psicrométrica durante el secado.

4.3 La Caída de Presión del Aire

La caída de presión en el flujo de aire determina la potencia requerida por el motoventilador, y depende directamente del factor más importante en el diseño de un sistema de secado a bajas temperaturas, que es el gasto de aire. Si el gasto de aire es insuficiente, el incrementar la temperatura sólo acelera el deterioro del grano. El modelo matemático determina la humedad del grano y la temperatura del aire de secado para cada estrato de la cama de granos correspondiente a diferentes tiempos de secado. Se puede determinar entonces el nivel de seguridad de almacenamiento. En particular se obtuvieron los valores del gasto de aire mínimos para asegurar un secado uniforme para toda la cama a diferentes profundidades de la misma y diferentes humedades iniciales del grano.

Determinado el gasto de aire del secador, se podrá calcular la caída de presión del aire. Cuando un flujo de aire es inducido o forzado por un ventilador a través de una cama de granos, se desarrolla una resistencia al flujo debido a la disipación de energía en fricción y turbulencia. La caída de presión para un flujo de aire al pasar por una cama porosa depende del gasto de aire, de las características de forma y de superficie del producto, del número, tamaño y configuración de los vacíos, de la uniformidad del tamaño de las partículas y de la profundidad de la cama. Para los productos agrícolas la información disponi

ble es empírica[22], resultado de experimentos de investigadores tales como Shedd (1953), ver figura 4.3.1. La caída de presión se expresa en pulgadas de agua por cada pie de profundidad, y el gasto en pies cúbicos por minuto por cada pie cuadrado de la cama de granos. Se emplean dichas unidades por ser las de uso común en la selección de ventiladores; para los cálculos las variables podrán expresarse en unidades SI. El gasto podría expresarse en dimensiones de velocidad, pero tal velocidad es aparente pues la velocidad real del aire con respecto al grano se determina al considerar la porosidad de la cama. Se ha desarrollado una ecuación que determina los valores de Shedd para un rango del gasto de 2.0 a 40.0 CFM/ft^2 (0.61 a 12.2 m^3/s m^2),

$$\Delta P = \frac{a\,\dot{V}^{2}}{\ln(1 + b\dot{V})} \qquad (4.3.1.)$$

para la cual se han encontrado las constantes a y b para diferentes tipos de granos[3];

Grano	Valor de a	Valor de b
avena	0.00080	0.074
cebada	0.00069	0.070
maíz	0.00065	0.156
soya	0.00036	0.092
trigo	0.00092	0.050

Los granos siempre acarrean consigo partículas extrañas a ellos, cascarilla y partículas de granos rotos. Se le denomina "finos" a todo este tipo de materia que pasa a través de una malla de orificios de 4.76 mm de diámetro. Se ha observado que al aumentar la fracción de finos se incrementa la caída de presión para la cama. Haque, Foster y Chung

(1978) correlacionaron datos experimentales para incluir el efecto de los finos[15] ,

$$\Delta P' = \Delta P\ (1 + kf) \qquad (4.3.2)$$

donde,

$$k = k\ (\dot{v})$$

$$f = \text{fracción de finos (decimal)}$$

Para $\Delta P'$ en Pa/m y $\dot{v}$ en $m^3/s\ m^2$:

$$\Delta P' = \frac{20\ 529.535\ \dot{v}^2}{L_n\ (1+30.597\ \dot{v})}\ (1 + (14.556 - 26.418\ \dot{v})\ f\ ) \qquad (4.3.3)$$

Desarrollando una regresión no lineal determinaron una expresión de más fácil manejo para los cálculos,

$$\Delta P' = C_1\dot{v} + C_2\ \dot{v}^2 + C_3\ \dot{v}\ f \qquad (4.3.4)$$

donde

$$c_1 = 436.667, \qquad c_2 = 7363.038, \qquad c_3 = 22525.819$$

La caída de presión en la cama de granos representa del 70 al 85 por ciento del total para un sistema común, según el gasto de aire. Generalmente los captadores solares de aire diseñados para el secado de granos no deben producir una caída de más de 0.1" de agua. Con base en lo anterior se determina la curva característica del sistema ΔP-$\dot{v}$, y conociendo el gasto se selecciona el ventilador adecuado y se determina la energía consumida por el secador de granos.

4.4. Secado Solar

La factibilidad y las ventajas del secado solar ya han sido descritas en el presente trabajo y comprobadas por Fernández et al. (1977)[9]. Se podrán conocer las características del sistema solar al relacionarlas con la humedad que se debe remover del grano por medio de la expresión,

$$\eta_c A_c \int_0^t H(t)\, dt = h_{fg} M_s (X_o - X_f) \qquad (4.4.1)$$

Referido a la unidad de masa del producto, a secar, y considerando que $M = M_s\ (1+X_o)$,

$$\eta_c A_c \int_0^t H(t) dt = h_{fg} \frac{X_o - X_f}{1 + X_o}$$

Al expresar la radiación solar en un promedio mensual y limitando el tiempo máximo del secado para evitar el deterioro de los granos, se tendrá una primera aproximación del área mínima de captación por unidad de masa del producto,

$$A_c = \frac{h_{fg}(X_o - X_f)}{(1+X_o)\ \eta_c\ \bar{H}\ \Delta T}$$

Por otra parte se ha comprobado que el área del techo de los almacenes típicos es suficiente para la captación de la radiación solar[10]. En consecuencia el techo tendrá una inclinación δ tal que la radiación incidente sea máxima, (generalmente la latitud del lugar). La superficie del captador es pues $(\cos \delta)^{-1}$ veces más grande que la superficie de la cama de granos.

Para simular la operación de un calentador solar es necesario conocer la distribución de la radiación a lo largo del tiempo. Fernández demostró que una predicción senoidal de la radiación solar es adecuada y de más fácil manejo que predicciones complejas como la propuesta por Liu y Jordan[11]. La radiación directa más difusa que incide sobre un plano horizontal se determina por la expresión,

$$H = H_M \cos \; t_1 \; \frac{\pi}{Ld} \qquad (4.4.2)$$

donde Ld es la longitud del día solar medida en horas y t_1 es una variable de tiempo medida en horas a partir del medio día solar, siendo positiva en la mañana y negativa en la tarde. La radiación máxima se podrá determinar con base en datos promedios mensuales de Almanza y López (1976)*. Integrando la expresión precedente con respecto al tiempo entre los límites -Ld/2 y Ld/2 e igualando al promedio mensual por la longitud promedio de un día determinado del mes,

$$\int_{-Ld/2}^{Ld/2} H(t)\, dt = \bar{H}_T \, Ld$$

$$H_M \int_{-Ld/2}^{Ld/2} \cos \frac{\pi}{Ld} t dt = 2 \, H_M \, \frac{Ld}{\pi} = \bar{H}_T Ld$$

$$H_M = \bar{H}_T \, \frac{\pi}{2}$$

*Almanza, S.R., López, R.S 1978, "Radiación Solar Global en la República Mexicana mediante Datos de Insolación", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

El promedio mensual leído en cartas, L, está medido en langleys (Ly); para pasar a unidades SI:

$$H_M = 1.163 \times 10^{-2} \frac{\pi}{2} \frac{L}{Ld} \qquad \frac{kJ}{m^2} \tag{4.4.3}$$

La longitud del día se determina mediante la expresión[8],

$$Ld = \frac{2}{15} \cos^{-1} (- tg\ \phi \ \ tg\delta) \tag{4.4.4}$$

donde ϕ es la latitud del lugar y δ la declinación. Esta última varía según el día calendario,

$$\delta = 23.45 \ \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \tag{4.4.5}$$

donde n es el número de día calendario (1,2,...364, 365).

El ángulo θ entre la normal al plano y la radiación directa incidente es tal que,

$$\begin{aligned} \cos \theta = {} & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \tag{4.4.6}$$

donde

ω = ángulo horario, 15°/hr, medido del alba al ocaso positivo en la mañana y negativo en la tarde

γ = ángulo de acimut, positivo hacia el este y negativo hacia el oeste.

Cuando el captador es orientado hacia el sur, se tiene $\gamma = 0$, y la expresión de $\cos\theta$ se reduce a:

$$\cos\theta = \cos(\phi-\delta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi-\delta)\sin\delta$$

Si se considera una superficie horizontal, la inclinación es nula y también el ángulo de acimut. Para este caso se tiene:

$$\cos\theta_z = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta$$

El factor de corrección, R_b, que es la relación entre la radiación que incide sobre el plano inclinado y aquella que incide sobre el plano horizontal es,

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \qquad (4.4.7)$$

Se determina la fracción de radiación directa y difusa de acuerdo a la nubosidad y se determina el factor de corrección R_b para la radiación directa H_b que incide sobre el plano inclinado. La radiación total que incide sobre la superficie de captación es,

$$H_t = H_b R_b + H_d \qquad (4.4.8)$$

Para determinar el incremento de la temperatura del aire al pasar por un captador solar del tipo descrito en la figura 2.3.1 se considera que

la ganancia de calor del aire es aquella que se transfiere de la placa al aire. Puesto que la temperatura de la placa absorbedora no es constante a lo largo del recorrido del aire por encima o por abajo de ella, según el diseño, se tiene,

$$UA_c \, \Delta TLM = \dot{m} \, c_a \, (T_s - T_\infty) \qquad (4.4.9)$$

De donde,

$$\frac{U \, A_c}{\dot{m} \, c_a} = \frac{T_s - T_\infty}{\Delta TLM}$$

al sumar y restar T_s al numerador del lado derecho de la ecuación,

$$\frac{U \, A_c}{\dot{m} \, c_a} = \frac{(T_s - T_\infty) - (T_s - T_a)}{\Delta TLM} = Ln \; \frac{T_s - T_\infty}{T_s - T_a}$$

Cambiando de signo y exponenciando,

$$\frac{T_s - T_\infty}{T_s - T_\infty} = Exp\{ - \frac{U \, A_c}{\dot{m} \, c_a} \}$$

sumando y restando T_∞ en el numerador y luego multiplicando por U/U,

$$1 - \frac{U \, (T_a - T_\infty)}{U \, (T_s - T_\infty)} = Exp \{ - \frac{U \, A_c}{\dot{m} \, c_a} \} \qquad (4.4.10)$$

En estado permanente, la energía que absorbe la placa es la que se transfiere al aire que circula,

$$\alpha \, H_t = U(T_s - T_\infty) \qquad (4.4.11)$$

Reacomodando la ecuación 4.4.10, se obtiene,

$$T_a - T_\infty = \frac{\alpha H_t}{U} \left(1 - \mathrm{Exp}\left(- \frac{U A_c}{\dot{m} c_a} \right)\right) \qquad (4.4.12)$$

Ismailova determinó las siguientes expresiones del número de Nusselt Para el cálculo del coeficiente de transferencia U[19]:

Para el flujo de aire entre la placa y la cubierta,

$$N_u = 0.42 \quad R_e^{0.85} \qquad 250 < R_e < 620$$
$$N_u = 11.1 \quad R_e^{0.156} \qquad 620 < R_e < 1400 \qquad (4.4.13)$$

Cuando la placa absorbedora también transfiere calor hacia abajo

$$N_u = 0.026 \quad R_e^{1.08} \qquad 170 < R_e < 520$$
$$N_u = 1.5 \quad R_e^{0.423} \qquad 520 < R_e < 1200 \qquad (4.4.14)$$

Bualow (1961) y Davis y Liepper(1961) encontraron los siguientes coeficientes para la ecuación 4.4.12 de acuerdo a trabajos experimentales sobre placas metálicas pintadas con pintura asfáltica negra[6,7],

$$T_a - T_\infty = k H_t \left(1 - \mathrm{Exp}\left(- \frac{n}{\phi} \right)\right) \qquad (4.4.15)$$

donde las constantes se definen por,

cubierta	k	n
vidrio	63.804	0.658
plástico	58.752	0.610
s/c	19.035	2.463

H_t está medida en kW/m^2 y $\dot{v}$ en $m^3/min.m^2$ (m^2 de captador).

Para simular las condiciones ambientales, se hicieron variar senoidalmente para los datos meteorológicos mensuales medios, (Atlas del Agua, 1975)* de tal forma que la temperatura ambiental fuese máxima al medio día y mínima al alba y al ocaso; e inversamente para la humedad relativa ambiental. En el caso de no encontrar los datos de humedades relativas máximas y mínimas para la localidad, se calcularon con las temperaturas máxima y mínima considerando la humedad específica constante durante el día.

$$T_\infty = \overline{T}_\infty + \left(\frac{T_{máx} - T_{mín}}{2}\right) \cos\left(t_2 \frac{360}{Ld} + \phi\right) \qquad (4.4.16)$$

$$Y_\infty = \overline{Y}_\infty + \left(\frac{Y_{máx} - Y_{mín}}{2}\right) \cos\left(t_2 \frac{360}{Ld}\right) \qquad (4.4.17)$$

Para $\phi = 180°$ la temperatura máxima se alcanza al medio día solar. Si $\phi = 135°$ se alcanzará a las 13:30 hrs. La variable t_2 medida en horas es tal que,

$$t_2 = Ld/2 - t_1$$

4.5 Calentamiento del aire por medio de resistencias eléctricas

Para tener condiciones constantes del aire de entrada al proceso de secado, se pensó en utilizar resistencias eléctricas. Debido a las condiciones de operación del dispositivo experimental la fuente de energía sería de dos baterías de 12 volts y de una capacidad de 67 A-hr cada una.

---

* Atlas del Agua de la República Mexicana, 1975, Secretaría de Recursos Hidráulicos.

El tipo de resistencias y la forma de disponerlas se determinó con el fin de alcanzar la máxima transferencia de calor para la energía generada por efecto Joule. Se decidió utilizar resistencias de NiCr que son comunmente utilizadas en radiadores eléctricos. El tipo que se prestaba más a la realización del experimento era el tipo resorte. La forma de disponer las resistencias eléctricas se determinó efectuando un análisis de transferencia de calor. En los análisis que siguen, las propiedades del aire y las fórmulas empleadas para determinar los coeficientes de transferencia de calor para las diferentes geometrías se obtuvieron de la referencia 18.

Suponiendo la resistencia eléctrica colocada en el flujo de aire como un cilindro horizontal cuyo eje es paralelo al flujo, se determina el coeficiente de transferencia de calor en convección forzada de acuerdo a un análisis de placa plana.

Propiedades del aire a 37°C (100°F)

ρ	$= 0.87086$	$kg\ m^{-3}$	$Pr = 0.72$
μ	$= 1.9122 \times 10^{-5}$	Nsm^{-2}	$R = 287\ Jkg^{-1}\ K^{-1}$
k	$= 0.026657$	$Wm^{-1}K^{-1}$	

La densidad del aire se determina según la ecuación de los gases perfectos, tomando en cuenta la presión barométrica de la Cd de México, $P_b = 0.7823$ bar

Suponiendo una velocidad del aire de 10 m/s, con la geometría de la resistencia eléctrica representada por L = 0.46 y $d = 5\times10^{-3}$ m, el número de Reynolds es:

$$R_e = \frac{\rho u L}{\mu} = 2.095 \times 10^5$$

De donde se obtiene el número de Nusselt,

$$\bar{N}_{u_L} = 0.664\ R_e^{0.5}\ Pr^{0.33} = 272.39$$

En consecuencia el coeficiente de transferencia de calor es,

$$\bar{h}_c = \bar{N}_{u_L}\ k/L = 15.78\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$$

Una segunda posibilidad de disponer la resistencia dentro del ducto era en forma de espiral cuyo eje es paralelo al flujo de aire. Las características del resorte serían entonces, L = 4.3 m, $d = 8\times10^{-4}$ m. Considerando el flujo de aire sobre un cilindro horizontal cuyo eje es perpendicular al flujo

$$\bar{h}_c = \frac{k}{d}\, c\ R_e^{\,n} \qquad (4.5.1)$$

Considerando la misma velocidad de flujo, u = 10 m/s, se obtiene el número de Reynolds,

$$R_{e_d} = \frac{\rho u d}{\mu} = 364.34$$

Por lo tanto las constantes de la ecuación 4.5.1 son c = 0.615 y n = 0.466. De donde el coeficiente de transferencia de calor es,

$$h_c = 320.08 \ W\,m^{-2}\,K^{-1}$$

Dicho valor es veinte veces más grande que el anterior, y para la misma temperatura de superficie el aire se calentará más en el caso de la espiral. Por lo tanto se dispuso la resistencia eléctrica en forma de espiral dentro del ducto.

Para determinar si las resistencias producirían una elevación de la temperatura ambiente suficiente para efectuar el secado del grano, se analizó la convección forzada con respecto a la convección natural del aire dentro del ducto que contiene las dos resistencias descritas. Al conectar una de las resistencias entre una diferencia de potencial de 24 volts, se alcanzó una temperatura de la superficie de 230°C. Esta temperatura se midió con un termopar cobre-constantán, la temperatura ambiente siendo de 25°C. Puesto que el calor que se genera es constante para los dos casos de convección forzada y natural del aire, la transferencia de calor también será constante para los dos casos,

$$q = \bar{h}_{cn} A_t (T_s - T_\infty)_{cn} = \bar{h}_{cf} A_t (T_s - T_\infty)_{cf} \qquad (4.5.2)$$

Siendo que el área de transferencia de calor es la misma,

$$\bar{h}_{cn} \ \Delta T_{cn} = \bar{h}_{cf} \ \Delta T_{cf}$$

dado que $\Delta T_{cn} \doteq 200°C$, para que $\Delta T_{cf} \geq 20°C$ se deberá cumplir que,

$$10 \ \bar{h}_{cn} \geq \bar{h}_{cf} \qquad (4.5.3)$$

Evaluando las propiedades del aire a la temperatura media de película

$$T_f = \frac{T_a + T_\infty}{2} = 127.5\ °C$$

$\rho = 0.6806\ kg\ m^{-3}$ $\mu = 2.2917\ Ns\ m^{-2}$

$k = 0.032\ W\ m^{-1}k^{-1}$ $\beta = 2.556 \times 10^{-3}\ K^{-1}$

$Pr = 0.715$

Considerando que $g = 9.81\ m/s^2$

$$g\beta\rho^2/\mu^2 = 2.21 \times 10^7\ K^{-1}m^{-3}$$

Determinando entonces los números de Grashof y de Rayleigh,

$$G_r = \frac{g\beta\rho^2}{\mu^2}\ d^3\ \Delta T = 2.26, \quad R_a = G_r P_r = 1.618$$

De la literatura se determina el coeficiente de transferencia de calor,

$$\bar{h}_{cn} = \frac{k}{d}\ 10^{0.05} = 44.9\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$$

Se cumple entonces la condición 4.5.3 cuando se tiene el caso extremo de $u = 10\ m/s$ y el coeficiente de transferencia de calor es de 320 $W/m^2\ K$. Para velocidades del aire menores se asegura entonces un calentamiento suficiente del aire.

Se instalaron en un ducto cuadrado de sección de $6.16 \times 10^{-3}\ m^2$ las dos resistencias de NiCr cuyas resistencias eléctricas medidas con un ohmmetro fueron $R_1 = 9.7$ ohms y $R_2 = 8.39$ ohms. La conexión se realizó en paralelo a una diferencia de potencial de 24 volts. Por lo tan

to la resistencia equivalente es de 4.41 ohms.

En estado permanente, el equilibrio térmico se gobierna por las siguientes ecuaciones,

Potencia generada

$$\dot{Q}_1 = V^2/R_{eq} \qquad (4.5.4)$$

Transferencia de calor de las resistencias

$$\dot{Q}_2 = h_c A_t (T_s - T_\infty) \qquad (4.5.5)$$

Energía transportada por el aire por unidad de tiempo

$$\dot{Q}_3 = \dot{m} c_a (T_o - T_\infty) \qquad (4.5.6)$$

Puesto que el voltaje es constante, Q_1 = 130.65 W, y suponiendo que $T_o - T_\infty$ = 15°C se puede evaluar en una primera instancia el gasto de aire; considerando que $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_3$,

$$\dot{m}\ Q_1/c_a \Delta T = 8.443 \times 10^{-3}\ \text{kg s}^{-1} = 30.4\ \text{kg hr}^{-1}$$

Tomando en cuenta una densidad del aire promedio entre la entrada y la salida del ducto,

$$\bar{\rho} = (\rho_{40} + \rho_{25})/2 = (0.8708+0.9147)/2 = 0.8928\ \text{kg m}^{-3}$$

$$\bar{\mu} = 1.912 \times 10^{-5}\ \text{Ns m}^{-2}$$

$$\bar{u} = \dot{m}/\rho A = 1.535\ \text{m s}^{-1}$$

El número de Reynolds será entonces,

$$Re_d = \frac{\rho \tilde{u} d}{\mu} = 57.35$$

Operando el dispositivo en tales condiciones, se midió la temperatura de superficie de la resistencia, $T_s = 100°C$. Analizando la transferencia de calor para un flujo de aire sobre un cilindro horizontal cuyo eje es perpendicular al flujo, ecuación 4.5.1

$$\bar{h}_c = \frac{k}{d}\ 0.615\ \ Re_d^{\ 0.466} \qquad (4.5.7)$$

Evaluando las propiedades del aire a la temperatura media de película,

$$T = \frac{T_s+T_\infty}{2} = \frac{100+25}{2} = 62.5°C$$

$$\rho = 0.8125\ kg\ m^{-3} \qquad k = 0.0282\ W\ m^{-1}K^{-1}$$

$$\mu = 2.0134 \times 10^{-5}\ Ns\ m^{-2}$$

De la ecuación 4.5.7,

$$h_c = \frac{0.0282}{8x10^{-4}}\ 0.615\ \left(\frac{0.8125x8x10^{-4}}{2.0134x10^{-5}}\right)^{0.466} \tilde{u}^{0.466}$$

$$h_c = 109.45\ \tilde{u}^{0.466}$$

El área de transferencia de calor es,

$$A_t = \pi dL = \pi x4.3x8x10^{-4} = 10.8x10^{-2}\ m^2$$

Considerando un equilibrio térmico en estado permanente, el calor generado eléctricamente por efecto Joule es igual al calor removido por convección forzada.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = h_c A_t (T_s - T_\infty)$$

Por lo tanto, para las condiciones citadas, se tiene:

$$\bar{h}_c = \frac{\dot{Q}_1}{A_t \Delta T} = \frac{130.65}{(108 \times 10^{-2})(75)} = 161.19 \quad W\, m^{-2}\, K^{-1}$$

Se puede entonces deducir la velocidad media,

$$109.45\, \bar{u}^{0.466} = 161.19$$

$$\bar{u} = 2.295\ m\, s^{-1}$$

Por lo tanto el gasto sería,

$$\dot{m} = \overline{\rho u}\, A = 0.0126\ Kg\, s^{-1} = 45.4\ kg\, hr^{-1}$$

De las relaciones precedentes se puede deducir una función de la velocidad media en el ducto y la diferencia de temperatura de la superficie de la resistencia y del ambiente,

$$\bar{h}_c = \dot{Q}_1 / A_t\, \Delta T = \frac{130.65}{(1.08 \times 10^{-2}) \Delta T}$$

$$\bar{h}_c = \frac{12\ 097.2}{\Delta T}$$

$$109.45\, \bar{u}^{0.466} = 12\ 097.2 / \Delta T$$

$$\Delta T\, \bar{u}^{0.466} = 110.53 \qquad (4.5.8)$$

Esta relación permite conocer el gasto de aire en el ducto teniendo como datos la temperatura de la superficie de la resistencia y la temperatura ambiente. Cabe hacer notar que es sólo válida dentro de un rango de temperatura puesto que la constante (109.45) se definió para un valor de la densidad y de la viscosidad dinámica, los cuales dependen de la temperatura. Con estas consideraciones se empleará esta relación que define el gasto durante el proceso experimental. Dicho dispositivo se conoce como anemómetro de termopar calentado.

5. SIMULACION EN COMPUTADORA

El programa de computadora se formuló en BASIC, y los resultados se obtuvieron en una máquina HP 9830A. Para iniciar el cálculo del proceso de secado es necesario conocer la temperatura y la humedad relativa en el plenum. Para ello se evaldan la temperatura y humedad relativa del ambiente y el aumento de temperatura del aire al pasar por el captador solar para cada incremento de tiempo. Se deben introducir al programa los datos meteorológicos según la fecha, los datos geográficos del sitio y el gasto de aire predeterminado en función de la profundidad de la cama de granos y la humedad inicial de éstos. Es necesario introducir las características de grano a secar tales como humedad inicial y humedad final deseada, la distancia característica l y la densidad de apilamiento en función de la humedad inicial (ver figura A1.5). Los valores del gasto de aire, de la caída de presión y de la potencia requerida por el motoventilador se evaldan específicamente por metro cuadrado de cama de granos.

El número de estratos está en función de la profundidad de la cama de granos de tal suerte que el espesor de cada estrato no exceda 5 cm. Por lo tanto se imprimirán los resultados sólo para algunas posiciones en la cama ya que si la profundidad de la cama es de 1.5 m se efectúan cálculos para 30 estratos. El tiempo de secado podrá ser del orden de varios días y en consecuencia se dispone de la opción de impresión de resultados por estratificación, o bien del promedio de la cama de granos para cada hora. Se podrá también tener la impresión cada número determinado de horas; por ejemplo al medio día.

El algoritmo del modelo de simulación se presenta en la figura 5.1, y en las páginas siguientes, un listado del programa junto con la nomenclatura empleada.

Para la obtención de la difusividad aparente como función de la humedad del grano, se simulan las condiciones controladas en el laboratorio y una vez determinada dicha función se incluye en el proceso de cálculo. El método de diseño de un sistema de secado solar con base en el modelo de simulación desarrollado es de carácter iterativo ya que se determina el efecto que produce el cambiar los valores de los parámetros de diseño. El criterio de diseño es el de realizar el secado en un tiempo prestablecido. El secador buscado es aquél que satisfaga este objetivo con un costo mínimo de materiales y de energía consumida en el ventilador. Para una capacidad de secado determinada, el costo inicial está determinado por el área de captación, y el costo de operación por la potencia del motoventilador requerida así como el tiempo de operación necesario. Al variar estas dos variables se obtendrá el diseño óptimo de

prácticamente cualquier tipo de secador solar de granos.

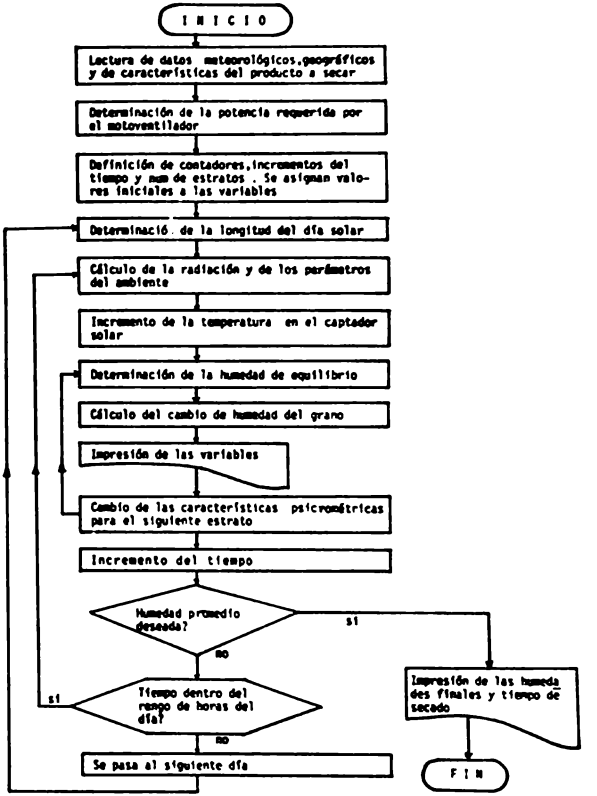


Fig 5.1 Algoritmo del programa Secado Solar Estratificado.

NOMENCLATURA DEL PROGRAMA

A(MATRIZ DE DISTRIBUCION DE HUMEDADES (B.H.), POR CIENTO

B PRESION BAROMETRICA, PSI

B1 DECREMENTO DE TEMPERATURA POR EVAPORACION, °C

C4 IMPRESION DE RESULTADOS CADA (C4) ESTRATOS

C5 IMPRESION DE RESULTADOS CADA (C5) HORAS

C9 CALOR ESPECIFICO DEL AIRE, KJ/KG°C

D DECLINACION

D0 DIFUSIVIDAD APARENTE, M^2/HR

D1 INCREMENTO DE TEMPERATURA (LETRERO IMPRESO)

D7 DECREMENTO DE HUMEDAD RELATIVA (LETRERO IMPRESO)

E2 ESPESOR DE LA CAMA, M

E9 EFICIENCIA DEL MOTOVENTILADOR, DECIMAL

F0 TEMPERATURA DEL AIRE, °R

F1 FRACCION DE FINOS, DECIMAL

F2 FUNCION DE T(BH) Y P*(VS)

F3 P*(VS), PRESION DE VAPOR SATURADO A T(BH), PSI

F4 DERIVADA DE F2

F5 P*(VS), PSI

F7 P(V), PRESION PARCIAL DEL VAPOR, PSI

F8 PRESION DE VAPOR SATURADO, PSI

G GASTO DE AIRE, KG/HR/M^2

HR HORA DEL DIA (LETRERO IMPRESO)

H1 RADIACION SOLAR, KW/M^2

H5 RADIACION PROMEDIO MENSUAL, KW/M^2

H7 CALOR LATENTE DEL AGUA LIBRE, KJ/KG

H8 CALOR LATENTE DEL AGUA EN EL GRANO, KJ/KG

H9 RADIACION SOLAR MAXIMA, KW/M^2

I INCREMENTO DEL TIEMPO, HR

I1 RADIACION SOLAR INSTANTANEA, KW/M^2

I2 RADIACION SOLAR DIRECTA, KW/M^2

I3 RADIACION SOLAR DIFUSA, KW/M^2

I4 RADIACION SOLAR INCIDENTE, KW/M^2

J VARIABLE DE TIEMPO, HR

K NUMERO DE ESTRATOS

K1 = 54.6327

K2 = 12301.686

K3 = 5.16923

K4 = 5.25 E-03

L1 LONGITUD DEL DIA SOLAR, HR

L2 VALOR ENTERO DE L1, HR

L7 DISTANCIA CARACTERISTICA DEL PRODUCTO, M

L8 LONGITUD PROMEDIO DEL DIA SOLAR, HR

L9 RADIACION PROMEDIO MENSUAL, LY

M MASA SECA DEL PRODUCTO POR ESTRATO KG/M^2

M1 MASA DEL GRANO HUMEDO, KG/M^2

N NUMERO DE DIA CALENDARIO (1,2,...,365)

N2 NUMERO DEL DIA DE PROCESO

O TIEMPO DE SECADO, HR

O2 VARIABLE DE TIEMPO, HR

O3 HORA DEL DIA SOLAR, HR

P VARIABLE DEL NO. DE ESTRATOS

P1 LATITUD

P2 CAIDA DE PRESION EN LA CAMA, PA/M

P3 POTENCIA DEL MOTOVENTILADOR, KW/M^2

PHI HUMEDAD RELATIVA (LETRERO IMPRESO)

PT POSICION EN LA CAMA (LETREPO IMPPESO)

Q VARIABLE INTERNA

2 CAUDAL DE AIRE, M↑3/S M↑2

6 VARIABLE INTERNA

8 ANGULO HORARIO, 15°/HR

DENSIDAD DEL PRODUCTO, KG/M↑3

2 DENSIDAD DEL AIRE, KG/M↑3

4 CONSTANTE DEL AIRE, J/KG K

9 FACTOR RB

ANGULO DE INCLINACION DEL CAPTADOR

1 TERMINOS DE LA SERIE...

2 ...EN PROCESO DE INTEGRACION

3 SUMATORIA DE LA HUMEDAD DEL PRODUCTO

0 TEMPERATURA DEL AIRE, °R

1 TEMPERATURA DE BULBO SECO, °C

3 TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO, °C

4 TEMPERATURA MINIMA PROMEDIO, °C

5 TEMPERATURA MEDIA PROMEDIO, °C

6 TEMPERATURA MAXIMA PROMEDIO, °C

9 TEMPERATURA DEL AMBIENTE, °C

VARIABLE TRIGONOMETRICA

VARIABLE TRIGONOMETRICA

1 GASTO DE AIRE POR M↑2 DE CAPTADOR, M↑3/MIN/M↑2

VARIABLE INTERNA DE VALOR ENTERO

3 HUMEDAD ESPECIFICA DE SATURACION

(V MATRIZ DE DISTRIBUCION DE HUMEDADES ESPECIFICAS

HUMEDAD DEL PRODUCTO (LETRERO IMPRESO)

EQ HUMEDAD DE EQUILIBRIO DEL PRODUCTO (LETRERO IMPRESO)

0 HUMEDAD INICIAL DEL PRODUCTO (E.H.), POR CIENTO

1 DECREMENTO DE HUMEDAD DEL PRODUCTO (B.S.), DECIMAL

3 HUMEDAD DEL PRODUCTO (B.S.), DECIMAL

4 HUMEDAD DEL PRODUCTO (B.S.), DECIMAL

5 HUMEDAD DE EQUILIBRIO DEL PRODUCTO (B.H.), POR CIENTO

6 HUMEDAD PROMEDIO DE LA CAMA (B.H.), POR CIENTO

9 HUMEDAD FINAL PROMEDIO DESEADA (B.H.), POR CIENTO

() MATRIZ DE DISTRIBUCION DE HUMEDADES (B.H.), POR CIENTO

1 HUMEDAD RELATIVA EN EL PLENUM, POR CIENTO

4 HUMEDAD RELATIVA MAXIMA PROMEDIO, POR CIENTO

5 HUMEDAD RELATIVA MEDIA PROMEDIO, POR CIENTO

6 HUMEDAD RELATIVA MINIMA PROMEDIO, POR CIENTO

8 HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE, POR CIENTO

() MATRIZ DE DITRIBUCION DE HUM. REL., POR CIENTO

VARIABLE INTERNA DE VALOR ENTERO

```
1 REM                    SECADO SO AR ESTRATIFICADO
2 REM                    ***********************
3 REM                    ****  ***********
4 REM
5 REM
10 REM  INTRODUCCION DE DATOS METEOROLOGICOS,GEOGRAFICOS Y DEL GRAN
20 READ Y5,T6,T4,Y5,C9,R4,N,I1,L7,L8,6
30 DATA 25,24.6,13.4,70,1.00,.287,.12,21.2,23.0,11,14.504
40 READ Y9,X0,X9,L7,P,F1,G,E2,K
50 DATA 0,.25,14,1.33E-03,653.5,0.1,.5,0.5,10
60 READ Y1,Y2,Y3,K4
70 DATA 54.6329,11.01,688,5.1632,5.35E-0
80 DATA 0.671,X0,21.9,1E-08
90 REM
100 FIXED 3
110 DIM X9(35), S(35),AS(35),AS(35)
120 M1=E2-P
130 M4=M1*(1-X0/100)/K
140 C4=M*C
150 C5=1
160 H5=1.163E-02*L9/L8
170 Y6=Y5+FNA(T5)/FNA(T6)
180 Y4=Y5+FNA(T5)-FNA(T4)
190 S=F1
200 R2=B*.1E+05/(14.504+(T5+273)*R4)
210 V1=G*(.05 S)/(60*R2)
220 REM  DATOS
230 F2=436.667+02+73.3.038+02+2.2525.819+02*F1
240 P3=1.1E-F2+E2.1E-03/(E9+0.P
250 PRINT "GASTO:";G;"LB HR/M";"ESPESOR";E2;"M
260 PRINT "PRESION A MOTOVENTILADOR (REND=";E9;") EN XN/M^2";P3
270 DISP   M=";Y4;"YMIN";Y6;"  OP";
280 INPUT Y3
290 PRINT  HUM. REL. MAX. DE OPERACION=";Y2;"%"
300 PRINT
310 PRINT
320 PRINT "HR";TAB(2);"TAB2";TAB(10);"T1";TAB(30);"X";TAB46;"  TAB50;"PHI"
330 PRINT
340 REM
350 REM
360 I=1
370 FOR N=1 TO K
380 A=N*L7/K
390 REM N
400 D=.3.15+2.1*(360/365*(284+N))
410 L= -TAN(P1)*TAN(D))
420 IF U 0 THEN 450
430 LET U=P*N*COS(1-U*2)/U
440 GO TO 460
450 LET U=.5+(ATN(SQR 1-U*2 /U)+PI/2)
460 H=1.33E-02*P1*.9 (2+L1
470 LET INT(L1)
480 LET 2
490 28*.5*J
500 06*J/.5
```

```
510 P1=FNR(.P)
520 Q2=L/2-J
530 Q3=12-J
540 Y8=T5+(T6-T4)/2*COS(Q2*360/L1+180)
550 Y1=T8*63.804*H1*(1-EXP(-0.658*V1))
560 Y8=Y5+(Y4-Y5)/2*COS(Q2*360/L1)
570 Y1=Y8-FNA(T3)/FNA(T1)
580 IF Y1>Y3 THEN 1280
590 K=1
600 S3=0
610 T0=9.5*T1+491.69
620 F7=V1*100*EXP(K1-(K2/T0)+3*LOG(T0))
630 F3=1.5*F7
640 T3=T0-(F3-F7)/K4
650 F3=V1*(K1-T3)-LOG(F3*T3*K3)
660 F4=-F2/(K4*T3*2)-(T3*K3+3*F3*T3*(K3-1)/K4)/(F3*T3*K3)
670 F5=F3-F2/F4
680 IF ABS(F5-F3)/F5 <= 0.01 THEN 710
690 F3=F5
700 GOTO 640
710 H3=0.622*F5/(B-F5)
720 T3=5/9*(T3-491.69)
730 IF INT(Q6)=Q/C5 THEN 750
740 GOTO 760
750 PRINT TAB(4);"D7=";T,-T0;"D";Y8-Y1;"T";BH;"=";T3;"T";BS;"=";T1
760 Y(P)=Y1
770 IF Y(P) <= 85 THEN 800
780 X5=0.5644*Y(P)-31.8
790 GOTO 810
800 X5=0.1407*Y(P)+4.1778
810 W(P)=0.622*(Y(P)/100)*FNR(T1)/(B-Y(P)/100*FNR(T1))
820 S1=0
830 FOR Z=1 TO 6
840 S2=(1/(2*Z-1)^2)*EXP(-(4*(2*Z-1)^2*(PI/L)^2*D0*I)
850 S1=S1+S2
860 NEXT Z
870 X(P)=5*A(P)-(5*A(P)*S1)
880 IF INT(X(P)/5)=0/5 THEN 900
890 GOTO 940
900 P=P/C4
910 IF INT(Q/C4)=P/C4 THEN 930
920 GOTO 940
930 PRINT Q310;PIT11;X5;X(P);W(P)
940 S3=S3+X(P)
950 X3=A(P)/(100-A(P))
960 X4=X(P)/(100-X(P))
970 X1=X3-X4
980 P=P+1
990 IF P>L THEN 1100
1000 W(P)=W(P-1)+.1*M/(G-I)
1010 H7=2502.7-2.38*T1
1020 H8=H7*(1+4.35*EXP(-28.2*X3))
1030 IF W(P)>=W3 THEN 1090
1040 B1=H8*X1*M/(C+G*I)
1050 B=B-B1
1060 LET T(P)=100-B*W(P)/3.[illegible]+FNA(T1)*X(P)+FNA(T1)
1070 IF T(P)>=100 THEN 1050
```

```
1090 GOTO 1170
1090 Y(P)=100
1100 H(P)=W3
1110 X1=(W3-H(P-1))*G*I/M
1120 LET X4=X3-X1
1130 Y(P-1)=100*X4/(1+X4)
1140 [illegible]
1150 T1=T3
1160 GOTO 600
1170 LET X6=S3/K
1180 D0=-0.631*X6+21.9)*1E-08
1190 IF [illegible]=0/C5 THEN 1210
1200 GOTO 1230
1210 PRINT TAB(7);"PDM="X6;"HORA";"DIA";N2
1220 PRINT
1230 O=O+1
1240 IF ABS(X6-X9)/X9 <= 0.05 THEN 1340
1250 FOR W=1 TO K
1260 A(W)=X(W)
1270 NEXT W
1280 [illegible]
1290 IF J <= -L2/2 THEN 1310
1300 GOTO 490
1310 N=N+1
1320 N2=N2+1
1330 GOTO 400
1340 PRINT
1350 PRINT "LAS HUMEDADES FINALES EN LOS ESTRATOS SON:
1360 FOR W=1 TO K
1370 PRINT X(W);
1380 NEXT W
1390 PRINT
1400 PRINT "TIEMPO TOTAL DE SECADO O-I";"EN";N2;"DIAS"
1410 END
1420 DEF FNA(T)
1430 F0=5/9*T+491.69
1440 F9=EXP(K1-(K2/F0)-(K3*LOG(F0)))
1450 RETURN F9
1460 END
1470 DEF FNC(D)
1480 [illegible]
1490 I2=0.6*I1
1500 I3=0.4*I1
1510 U=COS(P1-S)*COS(D)*COS(Q8)+SIN(P1-S)*SIN(D)
1520 V=COS(P1-S)*COS(D)*COS(Q8)+SIN(P1)*SIN(D)
1530 R9=U/V
1540 I4=I2*R9+I3
1550 RETURN I4
1560 END
```

GASTO= 325.000 KG/HR/M2 ESPESOR= 0.500 M
POTENCIA MOTOR ENVOLVENTE= 0.00 HP EN KW/M2 = 0.00
HUM. REL. MAX. DE OPERACION= 80.000 %

HR		PT	T1	EQ	X	PHI
DT= 4.533	DY= 10.955	T(BH)= 21.409	T(BS)= 34.400			
11.500	4.000	2.000	29.239	12.397	21.396	58.420
11.500	4.000	4.000	32.909	24.305	24.867	99.470
11.500	4.000	6.000	22.909	24.500	24.924	100.000
11.500	4.000	8.000	22.909	24.600	24.924	100.000
11.500	4.000	10.000	22.909	24.700	24.924	100.000
		% PROM= 23.847	HORA 4.000	DIA 1.000		
DT= 2.656	DY= 11.557	T(BH)= 21.101	T(BS)= 25.689			
15.500	9.000	2.000	25.407	12.653	16.325	68.765
15.500	9.000	4.000	21.101	14.389	24.924	100.000
15.500	9.000	6.000	21.101	14.389	25.000	100.000
15.500	9.000	8.000	21.101	14.389	25.000	100.000
15.500	9.000	10.000	21.101	15.389	25.000	100.000
		% PROM= 22.614	HORA 9.000	DIA 1.000		
DT= 3.546	DY= 16.976	T(BH)= 22.913	T(BS)= 34.419			
11.500	12.000	2.000	32.531	14.314	13.496	43.925
11.500	12.000	4.000	26.911	14.065	21.[illegible]	70.[illegible]
11.500	12.000	6.000	22.913	14.065	25.000	100.000
11.500	12.000	8.000	22.913	14.065	25.000	100.000
11.500	12.000	10.000	22.913	14.065	25.000	100.000
		% PROM= 21.372	HORA 12.000	DIA 2.000		
DT= 2.661	DY= 1.603	T(BH)= 21.391	T(BS)= 25.661			
15.500	15.000	2.000	21.913	12.627	12.233	60.350
15.500	16.000	4.000	26.474	13.021	16.[illegible]	52.949
15.500	16.000	6.000	21.091	15.292	24.9[illegible]	100.000
15.500	16.000	8.000	21.091	15.292	25.000	100.000
15.500	16.000	10.000	21.091	15.292	25.000	100.000
		% PROM= 20.088	HORA 16.000	DIA 2.000		
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
11.500	20.000	2.000	33.077	10.092	11.545	42.033
11.500	20.000	4.000	30.787	11.306	13.542	50.977
11.500	20.000	6.000	25.161	15.650	22.5[illegible]	81.538
11.500	20.000	8.000	22.913	14.600	24.[illegible]	100.000
11.500	20.000	10.000	22.916	14.600	24.[illegible]	100.000
		% PROM= 18.[illegible]	HORA 20.000	DIA 3.000		
DT= 2.667	DY= 11.640	T(BH)= 21.982	T(BS)= 25.63[illegible]			
15.500	24.000	2.000	27.369	11.754	11.367	50.[illegible]
15.500	24.000	4.000	23.499	11.660	2.[illegible]	[illegible]
15.500	24.000	6.000	22.919	12.923	17.[illegible]	6[illegible].15[illegible]
15.500	24.000	8.000	21.982	17.[illegible]	[illegible]	100.000
15.500	24.000	10.000	21.982	17.324	24.[illegible]	100.000
		% PROM= 17.[illegible]	HORA 24.000	DIA [illegible]		

DT= [illegible] b = [illegible] T(5H = 22.928 [illegible]

11.500	28.000	2.000	29.061	10.090	[illegible]	[illegible]
11.500	28.000	4.000	31.494	10.519	[illegible]	[illegible]
11.500	28.000	6.000	30.07[illegible]	11.767	13.824	53.937
[illegible]	28.000	8.000	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
11.500	28.000	10.000	22.930	24.500	23.900	[illegible]

PROM= [illegible].420 HORA 28.000 DIA [illegible].000

DT= 2.672 DI= [illegible].692 T(8H = 21.072 T(85)= 25.607

[illegible]	32.000	2.000	[illegible]	[illegible].240	[illegible]	[illegible].290
15.500	32.000	4.000	28.699	11.350	11.[illegible]	50.977
15.500	32.000	6.000	28.655	11.279	[illegible]	51.184
15.500	32.000	8.000	26.199	13.255	19.001	64.510
15.500	32.000	10.000	21.072	13.259	24.[illegible]	100.000

X PROM= 15.17[illegible] HORA 32.000 DIA 4.000

DT= [illegible] DI= [illegible].000 T(8H = 22.923 T [illegible]

11.500	36.000	2.000	30.013	10.126	11.122	42.275
11.500	36.000	4.000	31.531	10.982	11.245	47.791
11.500	36.000	6.000	30.963	11.221	11.370	50.059
11.500	36.000	8.000	29.836	11.914	14.308	54.98[illegible]
11.500	36.000	10.000	22.923	13.514	24.999	100.000

X PROM= 13.512 HORA 36.000 DIA 5.000

DT= [illegible] DI= 11.[illegible] T(8H = 21.869 T(85)= [illegible]

15.500	40.000	2.000	27.645	12.152	11.201	56.676
15.500	40.000	4.000	29.055	11.244	11.045	50.219
15.500	40.000	6.000	29.302	11.102	11.198	49.211
15.500	40.000	8.000	28.888	11.35[illegible]	12.249	50.9[illegible]
15.500	40.000	10.000	25.395	13.912	20.618	69.[illegible]

X PROM= 12.514 HORA 40.000 DIA [illegible].000

DT= [illegible] DI= 12.437 T(8H = 22.324 T(85)= [illegible].810

11.000	44.000	2.000	31.120	[illegible]	11.8[illegible]	49.0[illegible]
11.000	44.000	4.000	30.294	11.6[illegible]	11.936	51.830
11.000	44.000	6.000	30.514	11.470	11.357	51.882
11.000	44.000	8.000	30.659	11.331	11.407	51.268
11.000	44.000	10.000	29.576	12.070	15.236	56.098

X PROM= 12.034 HORA 44.000 DIA [illegible].000

DT= [illegible] DI= 11.3[illegible] T 8H = 22.030 T 85= 23.866

15.000	48.000	2.000	29.530	11.343	10.994	50.929
15.000	48.000	4.000	30.359	11.093	11.150	49.152
[illegible]	48.000	6.000	30.212	11.177	[illegible]	49.[illegible]
15.000	[illegible]	8.000	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
15.000	48.000	10.000	29.623	11.532	12.611	52.265

X PROM= 11.960 HORA 48.000 DIA [illegible].000

LAS HUMEDADES FINALES EN LOS ESTRATO SON:

11.001 10.994 11.070 [illegible] 11.209 11.150 11.3[illegible] 11.3[illegible]
11.4[illegible] 12.611

TIEMPO TOTAL DE MEZCLADO 43.000 EN [illegible].000 DIA

6. METODO EXPERIMENTAL

6.1 Construcción del aparato de calibración

El aparato utilizado para las tres pruebas se describe a continuación tomando en cuenta algunas modificaciones que se consideraron convenientes para la última prueba.

Su estructura es la siguiente, como se observa en la figura 6.1.1. La parte inferior consta de una caja de madera cuyas dimensiones son 50 por 35 cm. En la parte superior se acopló con tornillos una brida de acrílico transparente que forma la base de un cilindro del mismo material, el cual se utilizó como recipiente contenedor del maíz. Este recipiente tiene 85 cm de alto y un diámetro de 30 cm. La unión de la brida con la caja está sellada para evitar fugas de aire.

El grano se introduce por la parte superior del cilíndro y éste se cierra con una tapa de madera removible.

Entre la base del cilíndro y la caja se encuentra una malla de alambre cuya función es sostener los granos de maíz y permitir el paso del aire con el que se han de secar. Este flujo de aire tiene acceso a la caja por medio de un ducto metálico de sección cuadrada (8 por 8 cm) y 59 cm de largo insertado en un lado de la caja. El aire es forzado por un ventilador conectado en el extremo del ducto, y la unión está sellada también con hule de silicón al igual que el resto de las uniones. (Las razones por las que se escogió este tipo de ventilador se discuten por separado). El ducto descansa sobre dos soportes de madera que se encuentran fijados a una base también de madera mediante ángulos metálicos. Dentro de él se encuentran dos resistencias dispuestas de manera tal que presentan la mayor área posible al paso del aire con el fin de que éste pueda absorber la mayor cantidad de calor. Fig 6.1.2.

Cada resistencia está conectada a una diferencia de potencial de 24 volts. Para ello se utilizan baterías de 12 volts con capacidad de 67 A-hr. Una de ellas suministra además doce volts para el funcionamiento del ventilador. Como se explica en el procedimiento experimental, estas baterías resultaron insuficientes debido a que se descargaban rápidamente, por lo cual se recurrió al uso de un transformador rectificador (fig 6.1.2) como complemento de una batería, para dar mayor tiempo de carga a la bate -

ría utilizada*.

El interior del ducto está forrado con cartón de asbesto y las termina les de las resistencias se encuentran aisladas con el fin de evitar fal sos contactos y, por consiguiente, pérdidas de energía.

Para dar salida al aire después de su paso a través de la cama de gra nos, se cuenta con un ducto cilíndrico de 10 cm de diámetro y 31 cm de largo insertado en la parte lateral del cilindro con una orientación igual a la del ducto de entrada.

6.2 Controles de temperatura y gasto

En el ducto de entrada se encuentran dos termómetros, colocados entre la última resistencia y la entrada a la caja. Uno de ellos registra la temperatura de bulbo seco y otro la de bulbo húmedo, con lo cual se de termina la humedad relativa del aire después de pasar por las resisten cias. Esta humedad registrada no es de hecho la del aire que pasa por la cama de granos, pues se observó que al entrar a la caja se producía un abatimiento de temperatura.

Con objeto de obtener una lectura lo más confiable posible de la tempe ratura de entrada del aire, se instaló otro termómetro en la base del cilindro.

---

* Este aparato de pruebas fue diseñado para operar automáticamente en el campo, de modo que se seleccionaron baterías de automóvil como fuente de poder. En pruebas de campo estas baterías se recargarían por medio del sistema generador de un automóvil.

Para determinar las condiciones del aire de salida, el ducto superior está provisto de otros dos termómetros que registran las temperaturas de bulbo húmedo y seco. La humedad relativa del ambiente es determinada con otro par de termómetros iguales a los anteriores.

Para determinar el gasto de manera rápida durante la prueba, se decidió obtener la relación del gasto de aire con la temperatura de la siguiente forma:

A la resistencia más cercana a la entrada de la caja se conectó la punta de un termopar del tipo cobre-constantán y la otra se conectó a un multímetro digital, del cual las lecturas en milivolts, se convierten en temperaturas (en este caso la temperatura de la superficie de la resistencia) por medio de la curva de calibración del termopar.

Esta lectura varía según el gasto de aire, siendo ésta controlable por medio de tapas de madera de diferente abertura colocadas en el extremo del ducto superior.

Para el cálculo de la velocidad del aire se utilizó un tubo de Prandtl colocado en lugar de uno de los termómetros del ducto superior (fig 6.2.1); el tubo iba acoplado mediante mangueras a un piezómetro inclinado cuyo líquido manométrico es aceite y que produce lecturas en pulgadas de columna de agua. Para un correcto funcionamiento del piezómetro, en su parte superior tiene un nivel que sirve como referencia para su colocación. Dicha aparato se muestra en la fig 6.2.2. Las diferencias de altura detectadas variaban según la tapa y según el tipo de conexión, ya que se calcularon las presiones dinámica, estática y total con objeto de poder comprobar las lecturas, dado que se tiene $P_{total} = P_{estática} + P_{dinámica}$. Con la diferencia de altura correspondiente a la presión dinámica, se calculó la velocidad y con el producto de dicha velocidad por la densidad del aire y por el área transversal del ducto se determinó el gasto másico (kg/hora). A cada lectura del piezómetro correspondió una lectura del multímetro, con lo cual se formaron parejas de datos gasto-temperatura. Estos datos se suministraron a un programa de ajuste de curvas que ofrece 12 diferentes ecuaciones de correlación.* Para seleccionar la función más precisa, se toma en cuenta la desviación estándar y el residuo por cada punto.

En la memoria de cálculo se da la secuencia y un ejemplo de la determinación de esta ecuación.

---

* DELIQUET, A., Computer Program derives Equations, Hydrocarbon Processing, March 1979.

6.3 Procedimiento Experimental

Después de haberse realizado dos pruebas, de las cuales solamente se concluyó una debido a la descomposición del maíz en la primera, se decidió llevar a cabo una tercera prueba con el objeto tanto de comprobar los resultados obtenidos, como de corregir las fallas detectadas en el experimento anterior. Cabe hacer notar que los resultados esperados podían alejarse de los anteriores simplemente por el hecho de haber utilizado una cantidad de maíz que registró un peso de más del doble que en la prueba efectuada y además que el origen de dicho maíz era distinto en cada caso, por lo cual posiblemente fue humedecido después de cosecharse.

El maíz adquirido esta vez era proveniente del Estado de Morelos y tenía aproximadamente 24 horas de haber sido cosechado. Se desgranó a mano al igual que anteriormente ya que si se utilizaba una desgranadora de tipo comercial, el grano se hubiera partido debido a que se encontraba demasiado húmedo.

El peso del maíz desgranado fue de 15 kgs, con los cuales se dió inició el 22 de septiembre de 1979 al experimento, que se llevó a cabo en 5 etapas con una duración de 66 horas efectivas de secado.

Para determinar la humedad inicial del maíz, se tomaron aparte 30 gramos y se sometieron a la prueba de destilación, la cual se explica por separado (Apéndice 2).

Dicha humedad resultó del 69.0 por ciento en base húmeda, lo cual dió -

lugar a suponer que el maíz había sido humedecido, ya que la cifra promedio cuando el maíz ha sido cosechado a tiempo, oscila entre 30 y 45 por ciento.

El valor del gasto de aire durante toda la prueba se varío entre 50 y 57 kg/hora con el objeto de mantener una temperatura de entrada constante. Se tomaron lecturas de la altura de la cama (fig 6.3.1) con el objeto de conocer indirectamente la variación volumétrica del grano, ya que el área del recipiente es constante.

La primera etapa duró solamente dos horas, durante las cuales no hubo cambios apreciables en las condiciones del maíz. La altura de la cama, que era originalmente de 32.3 cm, disminuyó a 31.8 cm. Durante la noche permaneció destapado el cilindro para evitar la descomposición del grano.

Al día siguiente se comenzó la segunda etapa cuya duración fue de 10 horas. El primer paso fue tomar una muestra de maíz para determinar la humedad alcanzada después de las dos primeras horas de secado. Su valor fue de 57.33 por ciento. Es conveniente recordar que para determinar la humedad por el método de destilación, cada prueba tarda aproximadamente cuatro horas, por lo cual no se pueden tomar varias muestras para obtener un promedio. En las siguientes muestras (2 y 4 horas después), se detectó nuevamente una humedad alta, superior a la de la lectura anterior de 57.33 por ciento, lo cual significa que la muestra tomada inicialmente no fue representativa del contenido de humedad en el resto del grano.

Este problema ya no se presentó a partir de que el grano alcanzó una humedad inferior al 37 por ciento, pues en ese rango se utilizó el Radson siendo así posible tomar varias muestras para obtener mediciones instantáneas confiables.

Se tomaron lecturas de la altura de la casa de granos cada dos horas resultando decrementos entre 0.5 y 1 cm. Así, al final de esta etapa la altura fue de 27.3 cm y la humedad registró un valor de 62.66 por ciento. Nuevamente permaneció destapado el cilindro durante toda la noche.

La tercera etapa se inició a la mañana siguiente y concluyó 19 horas más tarde, después de las cuales disminuyó la humedad aproximadamente un 5 por ciento o sea hasta 57.66 por ciento. La altura de la casa llegó a 21.8 cm. Para entonces el tiempo de secado sumaba 31 horas, o sea la mitad del tiempo total, y como se puede notar, la disminución en el contenido de agua fue muy pequeña.

Esta tercera etapa se suspendió debido a que las baterías mantenían los 24 volts requeridos sólo por un corto tiempo, aún después de haber sido cargadas.

Debido a lo anterior, para la cuarta etapa se utilizó un transformador-rectificador para mantener las condiciones de 12 volts en el ventilador y 24 volts en las resistencias. Estos 24 volts eran resultado de conectar en serie el transformador con una de las baterías.

Los decrementos en la altura de la cama resultaron cada vez menores como era de esperarse y después de cuatro horas de secado de esta etapa, o sea 35 horas acumuladas, se redujo la altura de la cama a 21.5 cm, lo que equivale a aproximadamente la mitad de la disminución total. En ese tiempo la humedad bajó a 52.66 por ciento.

Durante las siguientes 5 horas nuevamente se tuvo el problema de las baterías, ya que el tiempo empleado para recargarlas no era suficiente mientras funcionaba una de ellas. Para solucionar ésto, se decidió alimentar las resistencias directo de la línea de 120-7 volts, provocando una caída de 96-103 volts mediante otra resistencia a fin de lograr los 24 volts deseados. Se continuó el secado y se tomaron lecturas de humedad en las horas 40 y 46 resultando 49.5 por ciento y 46.5 por ciento respectivamente. En la hora 50 se dió por concluída esta etapa cuya duración fue 19 horas al igual que la anterior.

Hasta ese punto se llegó a una humedad de 38.0 por ciento aproximadamente y la altura de la cama fue de 17.1 cm. La quinta y última etapa duró 16 horas, después de las cuales se llegó a la humedad deseada de 9.75 por ciento.

A partir de la hora 54 se utilizó el Radson. Para determinar la humedad se tomaron 5 muestras cada hora y se promediaron a fin de obtener un resultado representativo.

Hubo oportunidad de comparar los resultados entre el método de destilación y el Radson en cuatro diferentes horas, resultando una desvia -

ción promedio de 6 por ciento. La disminución de humedad durante las últimas 11 horas resultó bastante uniforme.

Finalmente, después de 66 horas efectivas de secado se obtuvo lo si - guiente:

Gasto promedio	=	55.21 kg/hr
Humedad inicial	=	69.00 por ciento
Humedad final	=	9.75 por ciento
Total de humedad removida	=	59.25 por ciento
Altura inicial de la cama de granos	=	32.3 cm
Altura final de la cama de granos	=	10.2 cm
Peso inicial	=	15.0 kgs
Peso final	=	4.5 kgs

No se tomaron en cuenta las muestras empleadas para el método de destilación, las cuales suman aproximadamente 500 gramos. También se perdió un poco de peso debido a los finos que se filtraron a través de la ma - lla.

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan en las tablas 1 y 2, los datos experimentales obtenidos en la última prueba y la secuencia de operaciones para llegar a los resultados. La forma de obtención ya ha sido descrita previamente. En el apéndice 4 se incluye el conjunto de datos y resultados referente a las dos primeras pruebas.

7.1 Determinación del gasto

Para ilustrar el método por el cual se determinó el gasto de aire, se consideran los datos correspondientes a la tapa No. 6 que se muestran en la tabla 7.1.

Δh_{total} = 0.590 pulgadas de agua

$\Delta h_{estática}$ = 0.585 pulgadas de agua

$\Delta h_{dinámica}$ = 0.005 " " " "

Se ve que las lecturas concuerdan ya que $\Delta h_{total} = \Delta h_{estática} + \Delta h_{dinámica}$.

Para determinar la velocidad del aire, se toma el valor de $h_{dinámica}$ y se transforma de pulgadas de agua a metros de aire, o sea:

$$0.005 \text{ plg agua} \times \frac{0.0254 \text{ m}}{1 \text{ plg}} = 1.27 \times 10^{-4} \text{ metros de agua}$$

$$h_{aire}\,\rho_{aire} = h_{agua}\,\rho_{agua} \qquad \text{de donde:} \quad h_{aire} = h_{agua}\,\frac{\rho_{agua}}{\rho_{aire}}$$

A la temperatura de trabajo se tiene:

$$\rho_{agua} = 1000 \text{ Kg/m}^3$$
$$\rho_{aire} = 0.880 \text{ Kg/m}^3$$

por lo tanto $h_{aire} = h_{agua} \times \frac{1000}{0.880} = 1136.36\ h_{agua}$

Sustituyendo el valor de h_{agua}:

$$h_{aire} = 1136.36 \times 1.27 \times 10^{-4} = 0.14431 \text{ metros de aire}$$

Utilizando la fórmula $u = (2gh)^{1/2}$ donde:

u = velocidad del aire en m/s

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/seg^2

h = altura en metros de aire

resulta: $u = (2 \times 9.81 \times 0.14431)^{1/2} = 1.6827$ m/s

El área de la sección transversal del ducto es:

$A = \pi D^2/4$ donde D es el diámetro del ducto = 0.1 m

$A = 78.54 \times 10^{-4}\ m^2$

de donde:

$$\text{Gasto} = \rho\ u\ A$$

$$= 0.880 \times 1.6827 \times 78.54 \times 10^{-4} = 0.01163\ kg/s$$

$$= 0.01163 \times 3600 = 41.868\ kg/hr$$

Reduciendo a otra expresión más simple, se puede calcular el gasto como:

$$\text{Gasto} = 110.21\ (h_{aire})^{1/2}$$

h_{aire} en metros

Gasto en kg/hr.

Usando las curvas de calibración del termopar, se obtienen los siguientes resultados:

Lectura en milivolts	Temperatura de la superficie de la resistencia (°C)
7.3	162.0
7.12	158.5
5.5	126.0
3.57	84.8
2.74	66.2
2.5	60.08
1.62	40.20

Finalmente para determinar la ecuación característica, se utilizan las parejas de datos gasto-ΔT donde ΔT representa la diferencia de temperatura

entre la superficie de la resistencia y el medio ambiente. Estos datos aparecen en la siguiente tabla:

TAPA	GASTO(kg/hr)	Δ T (°C)
6	41.868	141.75
5	52.959	138.25
4	56.172	105.75
3	59.210	64.55
2	62.100	45.95
1	67.510	39.83
sin tapa	156.656	19.95

Como se puede observar, hay un cambio muy brusco en los valores del gasto cuando la prueba se realiza sin tapa. Debido a esto, se corrió el programa de ajuste de curvas dos veces, incluyendo la primera vez los 7 pares de datos, y la segunda vez sólo los 6 primeros pares, desechando aquel donde el gasto toma un valor muy alto. De cada corrida se seleccionaron dos ecuaciones, y de esas 4 ecuaciones, se tomó la que se acercaba más a los datos experimentales. Esta ecuación no toma en cuenta el valor del gasto sin tapa, lo cual es aceptable ya que durante el experimento nunca se utilizó un gasto próximo a ese valor.

La ecuación obtenida es:

$$G = \frac{988.31}{T} + 42.390$$

donde:

T = Diferencia de temperatura entre la superficie de la resistencia y el ambiente (°C)

G = Gasto de aire (kg/hr)

TAPA	Δh_{total} (plg agua)	$\Delta h_{estática}$ (plg agua)	$\Delta h_{dinámica}$ (plg agua)	voltaje (milivolts)	T bulbo seco °C	T ambiente °C
6	0.590	0.585	0.005	7.30	78	20.25
5	0.570	0.562	0.008	7.12	71	20.25
4	0.550	0.540	0.009	5.50	56	20.25
3	0.490	0.480	0.010	3.57	36	20.25
2	0.430	0.418	0.011	2.74	28	20.25
1	0.410	0.395	0.013	2.50	27	20.25
sin tapa	0.100	0.040	0.070	1.62	24	20.25

TABLA 7.1. LECTURAS OBTENIDAS DURANTE LA PRUEBA DE CALIBRACION PARA CALCULO DE LA CURVA CARACTERISTICA GASTO - TEMPERATURA

7.2 Cálculo de las características psicrométricas del aire

Para determinar la humedad relativa del aire tanto de entrada como de salida, se utilizó la ecuación de Carrier [16] :

$$P_v = P_w - \frac{(T_{bs} - T_{bh})\ (P_b - P_w)}{2\ 800 - 1.3\ T_{bh}}$$

donde

P_v = Presión del vapor de agua (plg de Hg)

P_w = Presión de evaporación del líquido a T_{bh} (plg de Hg)

T_{bs} = Temperatura de bulbo seco (°F)

T_{bh} = Temperatura de bulbo húmedo (°F)

P_b = Presión barométrica (plg de Hg)

La presión de evaporación del líquido (P_w) se obtiene de las tablas psicrométricas [15] entrando con el valor de la temperatura de bulbo húmedo.

Una vez calculada la presión de vapor, la humedad relativa se obtiene de la relación:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100$$

donde:

ϕ = humedad relativa del aire (por ciento)

P_{vs} = presión de saturación a la T_{bs} . (plg de Hg)

A continuación se muestra la secuencia de cálculo para una hora, y en la tabla 7.3 se presentan los resultados, considerando el promedio de las primeras 51 horas (durante las cuales no hubo mucha variación) y las últimas 15 horas que muestran la variación de la humedad relativa en el aire de salida.

Considerando la primera hora de secado, de la tabla 7.2 se tiene:

Condiciones del aire después de las resistencias:

T_{bs} = 38 °C = 100.4 °F

T_{bh} = 22 °C = 71.6 °F

T_{real} = 33 °C = 91.4 °F

con T_{bh} = 71.6 °F, de tablas se obtiene: P_w = 0.78007 plg Hg

La presión barométrica en la ciudad de México es P_b = 23.101 plg Hg.

$$\therefore \quad P_v = 0.78007 - \frac{(100.4 - 71.6)\ (23.101 - 0.78007)}{2800 - 1.3\ (71.6)}$$

$$P_v = 0.54258 \text{ plg de Hg.}$$

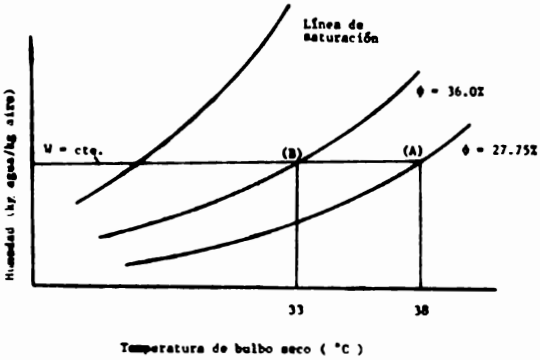
De la misma tabla, con la T_{bs} = 100.4 °F se tiene P_{vs} = 1.95512 (plg Hg)

de donde $\phi_1 = \dfrac{P_v \times 100}{P_{vs}} = \dfrac{0.54258}{1.95512} = 27.75$ por ciento

Debido a la caída de temperatura dentro de la caja, se ve que la humedad relativa real del aire de entrada debe calcularse con la T_{real}, para lo cual,

considerando que el contenido de agua en el aire es constante, se puede utilizar la carta psicrométrica para la ciudad de México* en la siguiente forma: se localiza el punto que representa ϕ_1 = 27.75 por ciento, T_{bs} = 38 °C (A) y siguiendo la línea de contenido de humedad cte (kg agua/kg aire), se intersecta con la de T_{real} = 33 °C, con lo cual se obtiene ϕ = 36 por ciento (B).

Gráficamente:



* Romero López A.F. Enero 4, 1977. Propiedades Termodinámicas de gases y vapores. Cd. Universitaria, México, D. F.

Una forma de comprobar si las mediciones efectuadas durante la prueba fueron correctas, es calculando la cantidad de agua absorbida por el aire. Dicha cantidad de agua deberá ser igual a la cantidad de agua removida del grano.

Tomando los promedios de temperatura y humedad relativa del aire de entrada y salida, de la carta psicrométrica se obtiene la humedad específica para ambas condiciones. Si se multiplica la diferencia entre dichas humedades por el gasto de aire y por el tiempo de secado, el resultado será la cantidad de agua removida por el aire.

La masa seca de maíz resultó ser 4.69 kg; por lo tanto la cantidad de agua que perdió es igual a la diferencia entre el peso original (15 kg) y la masa seca, o sea 10.31 kg.

Los promedios obtenidos son:

Temp. entrada del aire = 28.83 °C

Humedad relativa de entrada = 34.08 por ciento

Temp. del aire de salida = 17.30 °C

Humedad relativa de salida = 87.08 por ciento

De la carta psicrométrica se tiene:

Para la salida: humedad específica = 0.0143 kg agua/kg aire

Para la entrada: humedad específica = 0.0114 " " " "

Diferencia de humedad = 2.9×10^{-3} kg agua/kg aire = ΔW

Se puede plantear la ecuación:

$$\text{Gasto} \times \text{tiempo} \times \Delta W = 10.31 \text{ Kg}$$

de donde despejando el gasto se tiene:

$$\text{Gasto} = \frac{10.31}{\Delta W \times \text{tiempo}} = \frac{10.31}{2.9 \times 10^{-3} \times 66} \frac{\frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire}}}{\text{x hora}}$$

$$= 53.866 \text{ kg aire/hora}$$

De la tabla 7.3 se ve que el promedio del gasto real es 55.21 kg/hora, con lo cual el error entre el gasto "teórico" y el medido resulta de 2.43 por ciento. Esto permite decir que las lecturas se encuentran dentro de un margen de error aceptable.

TIEMPO DE SECADO (HORAS)	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. B. SECO (1) (°C)	TEMP. B. HUMEDO (1) (°C)	T_{REAL} (°C)	TEMP. B. SECO (2) (°C)	TEMP. B. HUMEDO (2) (°C)	MILIVOLTS (M. V.)	ALTURA DE LA CAMA (cm)	HUMEDAD DEL GRAN (POR CIEN
0	-	-	-	-	-	-	-	32.3	69.00
1	20.25	38.0	22.0	33.0	17.5	17.0	3.91	-	-
2	19.0	37.0	22.0	32.0	18.5	18.0	3.85	31.8	57.33
3	18.5	39.0	22.0	34.0	23.5	23.5	4.00	-	-
4	20.0	38.5	21.0	33.5	18.0	18.0	3.82	30.3	-
5	20.5	40.0	21.5	35.0	18.0	17.5	3.98	-	68.00
6	21.5	35.5	21.0	30.5	19.0	18.5	3.99	29.5	-
7	21.5	38.5	21.0	33.5	18.5	18.0	3.90	-	-
8	22.0	38.5	21.0	33.5	18.5	17.5	3.85	28.8	56.66
9	20.0	36.5	21.5	32.0	18.0	17.5	3.55	-	-
10	20.0	36.0	21.5	31.0	19.0	18.0	3.57	27.8	-
11	18.5	35.0	21.0	30.0	19.0	18.5	3.54	-	62.66
12	18.0	34.0	21.0	29.0	17.5	17.0	3.60	27.3	-
13	14.5	30.5	20.5	25.0	20.0	19.8	3.42	-	-
14	16.5	31.0	18.0	26.0	16.1	16.0	3.45	27.1	-
15	18.0	34.0	19.0	28.5	16.0	15.5	3.90	-	62.00
16	19.0	38.5	19.0	29.5	16.0	15.0	3.63	26.5	-
17	20.0	38.0	19.0	30.0	17.0	16.0	3.56	-	-
18	20.0	39.5	20.0	31.0	16.0	15.0	3.86	26.0	-
19	21.0	39.0	20.0	31.0	17.5	17.0	3.82	-	-
20	20.5	39.5	20.0	31.5	17.5	17.0	3.84	24.8	59.50
21	20.0	40.0	21.5	31.5	17.5	17.0	3.95	-	-
22	19.0	38.5	21.0	30.5	18.5	18.0	3.80	23.8	-
23	18.5	38.5	21.0	30.5	18.0	17.5	3.70	-	-
24	18.0	40.0	21.0	30.0	18.0	17.0	3.90	23.1	-
25	17.0	39.5	20.5	29.0	18.0	17.5	3.70	-	57.6

TIEMPO DE SECADO (HORAS)	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. B. SECO (1) (°C)	TEMP. B. HUMEDO (1) (°C)	T_{REAL} (°C)	TEMP. B. SECO (2) (°C)	TEMP. B. HUMEDO (2) (°C)
26	16.5	39.0	19.5	27.0	17.0	16.5
27	16.5	38.5	21.0	27.0	16.5	16.0
28	16.0	39.0	20.0	28.0	17.5	17.0
29	16.0	39.5	22.0	27.0	17.0	16.0
30	16.0	44.5	22.0	28.5	16.0	15.0
31	15.0	35.0	19.0	26.0	16.0	16.0
32	22.2	39.5	22.0	27.5	21.5	20.0
33	19.2	37.5	20.5	28.0	17.0	17.0
34	17.0	37.0	22.5	27.0	16.0	15.5
35	16.0	38.0	23.0	27.0	15.5	14.0
36	15.0	39.0	22.5	24.0	15.5	15.0
37	15.5	38.0	22.5	26.5	13.5	12.2
38	15.0	40.0	20.0	27.5	16.5	16.0
39	15.0	40.5	22.0	27.0	16.0	15.5
40	14.0	39.0	20.0	28.0	16.0	15.5
41	15.0	36.0	19.0	26.0	15.5	15.0
42	16.0	38.0	17.5	27.0	15.5	15.0
43	17.0	40.0	17.5	29.0	15.5	15.0
44	17.5	40.0	19.5	29.5	16.0	15.5
45	19.5	39.0	18.5	30.0	17.0	16.5
46	20.0	35.0	17.5	30.0	15.0	14.0
47	21.0	35.0	17.5	30.0	15.0	14.5
48	21.0	34.0	17.5	30.0	17.5	17.0
49	22.0	33.0	18.0	29.0	18.0	17.0
50	19.5	37.0	18.5	29.0	16.5	16.0

TIEMPO DE SECADO (HORAS)	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. B. SECO (1) (°C)	TEM. B. HUMEDO (1) (°C)	T_{REAL} (°C)	TEMP. B. SECO (2) (°C)	TEMP. B. HUMEDO (2) (°C)	HELIVOCES (H.V.)	ALTURA DE LA CAMA (cm)	HUMEDAD DEL GRANO (POR CIENTO
51	16.5	39.0	15.5	27.5	13.0	12.1	4.30	16.3	36.83
52	18.0	39.0	17.0	29.0	14.0	13.0	4.15	-	33.0
53	19.5	36.0	16.0	27.0	15.0	13.5	3.61	15.3	31.3
54	20.0	36.0	16.0	27.0	16.0	15.0	3.63	-	28.2
55	20.0	36.5	17.0	28.0	15.5	14.0	3.90	13.2	25.4
56	18.5	35.5	17.0	27.5	16.5	14.0	3.91	12.5	23.50
57	17.0	36.0	18.5	27.0	16.0	13.5	4.25	-	21.74
58	17.5	36.0	18.0	27.0	17.0	14.0	4.01	11.8	19.88
59	16.0	37.5	19.0	27.0	18.5	14.5	4.25	11.5	17.42
60	16.0	37.0	19.0	26.5	18.0	13.5	4.40	10.8	14.60
61	15.0	38.0	18.5	27.0	19.0	13.5	4.25	10.6	12.92
62	15.0	37.5	19.0	26.5	19.0	13.0	4.15	10.4	12.02
63	14.5	37.5	19.0	26.5	19.0	13.0	4.40	10.3	11.30
64	16.0	37.5	18.5	27.0	20.0	13.0	4.30	10.3	10.86
65	18.0	37.0	19.0	27.5	20.5	12.5	4.21	10.2	10.10
66	20.0	34.0	16.5	28.5	24.0	14.0	3.52	10.2	9.75

TABLA 7.2 Lecturas correspondientes al proceso de secado.

HORA DE SECADO (hrs.)	TEMPERATURA REAL DE ENTRADA (°C)	HUMEDAD RELATIVA DE ENTRADA (por ciento)	HUMEDAD RELATIVA DE SALIDA (por ciento)	GASTO DE AIRE (kg/hr)
del inicio hasta la hora 51 (promedio)	29.29	35.50	92.90	55.98
52	29.0	19.0	89.79	54.89
53	27.0	22.0	86.39	57.24
54	27.0	22.0	88.00	57.35
55	28.0	25.0	85.80	56.10
56	27.5	26.0	78.10	55.82
57	27.0	33.0	77.89	54.30
58	27.0	31.0	74.34	55.14
59	27.0	33.0	67.73	54.16
60	26.5	35.0	64.00	53.73
61	27.0	31.5	57.81	54.14
62	26.5	34.5	54.35	54.44
63	26.5	34.5	54.35	53.56
64	27.0	32.0	48.91	54.02
65	27.5	34.0	43.17	54.74
66	28.5	26.0	38.67	57.82

Los valores promedio durante toda la prueba, o sea para las 66 horas de secado, son los siguientes :

Temperatura real del aire de entrada = 28.83 °C
Humedad relativa del aire de entrada = 34.08 por ciento
Humedad relativa del aire de salida = 87.08 por ciento
Gasto de aire = 55.21 kg/hr

TABLA 7.3 Características psicrométricas del aire durante la prueba final de secado.

8. CORRELACION DE RESULTADOS

8.1 Determinación de la difusividad aparente

De la figura 8.1 que describe la variación de la humedad promedio con respecto al tiempo, se observa que para las primeras 46 horas de secado, la velocidad de secado puede considerarse constante, 0.51 por ciento por hora. Se comprueba así lo descrito en la teoría, ya que las humedades son muy altas y entonces la resistencia exterior es mayor a la interior y por lo tanto la primera domina el proceso. En consecuencia, se consideró un análisis a partir de la hora 52 cuando se nota un cambio notable del comportamiento anterior. Para tal hora la humedad medida era de 33 por ciento (b.h.) que generalmente se considera como máxima al iniciarse los procesos de secado.

Para simular el secado, se tomó la temperatura promedio del plenum para las 14 horas y se aproximó la variación de la humedad relativa de entrada a la cama por una senoide, figura 8.2, pues un promedio no reflejaría la realidad. Se tomó en cuenta el hecho de que después de cada hora, al efectuar la medición de la humedad, se mezclaba el grano de manera que la distribución de humedades fuera lo más homogénea. Al hacer variar el coeficiente de difusión entre los valores de $1x10^{-8}$ y $1.5x10^{-7}$ m^2/hr, la curva experimental se encuentra dentro de la región descrita por las curvas teóricas, ver figura 8.3. Se procedió a identificar las dos curvas, teórica y experimental, en la primera tomando valores discretos del coeficiente de difusión. Como se observa en la figura 8.4 no existe correlación para todos los valores de dicho coeficiente, sin embargo se distingue que la difusividad aparente tiende a aumentar a medida que disminuye la humedad promedio de la cama de granos. Se definió entonces la relación:

$$D^a = (-\ 63.1\ X + 21.9) \times 10^{-8} \quad m^2/hr \qquad (8.1.1)$$

Al incorporarla al modelo de simulación se obtuvo la curva teórica de la figura 8.5, para la cual la desviación máxima es de 1.2 por ciento y la desviación promedio es de 0.57 por ciento con respecto a la curva experimental. Dada la precisión de las mediciones efectuadas y puesto que se consideran promedios de humedad para la evaluación de D^a, la descripción teórica del proceso es aceptable. Al considerar la variación de la humedad por estratos, figura 8.6, los datos experimentales estarán contenidos en la región definida y se concluye entonces que el modelo de simulación desarrollado predice con exactitud el proceso de-

secado de una cama de granos. La mejora en la precisión de este método con respecto a los métodos usados anteriormente se destaca al observar la curva de la figura 8.7, obtenida por Fernández y Muñoz[11] y que exhibe correlaciones teórico-experimentales poco aceptables comparativamente.

8.2 Variación del Gasto de acuerdo a la profundidad de la cama de granos

Con objeto de determinar el gasto de aire mínimo, se obtuvieron los perfiles de humedad de la cama de granos para diferentes profundidades de la misma y para diferentes gastos. Se consideraron también diferentes humedades iniciales del grano.

El criterio de selección del gasto óptimo es de evitar que los estratos superiores se deterioren por crecimiento de hongos debido a una exposición prolongada a condiciones de aire saturado. Se debe procurar que la velocidad de secado no sea demasiado alta para evitar la fractura de los granos debida a tensiones causadas por gradientes altos de humedad dentro de los mismos. Los tiempos máximos de almacenaje se determinaron con base en una pérdida menor del uno por ciento de materia seca de acuerdo a la temperatura del aire y a la humedad del grano. Dichos valores se obtuvieron de la tabla A1.1 del apéndice A1. Para fines de comparación, se consideran constantes la temperatura y humedad relativa del aire dentro del plenum, y se considera un tiempo de secado de diez horas por día en todos los casos. En la figura 8.8 se trazaron los perfiles de humedad para tres gastos diferentes considerando una -

profundidad de la cama de grano de 0.5 m con humedad inicial de 30 por ciento (b.h.). Para tales condiciones de humedad del grano y temperatura del aire de 18°C obtenida en la simulación, el tiempo máximo permisible para evitar el deterioro del grano es de 4 días. Se observa que el gasto de 200 kg/hr m^2 es insuficiente debido a que el último estrato mantiene la humedad inicial por un período mayor al permitido. El gasto de 500 kg/hr m^2 reduce la humedad del último estrato en sólo 26 hr, mientras que el gasto de 350 kg/hr m^2 disminuye la humedad de éste a menos del 20 por ciento en 35 horas de operación. En consecuencia se selecciona el último gasto como el apropiado para las condiciones descritas. El análisis descrito se repite para las figuras 8.9 a 8.11 de las cuales se concluye lo siguiente:

- Para una humedad inicial de 25 por ciento, si la profundidad de la cama es de 0.5 m el gasto de 200 kg/hr m^2 es suficiente; y para 1 m de profundidad el gasto apropiado es de 350 kg/hr m^2

- Para una humedad inicial de 20 por ciento el gasto de 200 kg/hr m^2 resulta suficiente en amplio margen cuando la profundidad de la cama es de 1.5 m

De lo anterior se establece un criterio para seleccionar el gasto adecuado de acuerdo con la capacidad requerida de los almacenes y las condiciones de cosecha usuales.

La figura 8.12 describe los perfiles de humedad para un mismo gasto de aire revelando la influencia de la humedad inicial del grano sobre la

rapidez del proceso. La variación temporal de la humedad promedio de la cama en función de la humedad inicial del grano se representa en la figura 8.13.

Finalmente se muestra el efecto que produce el incrementar el gasto de aire en la variación de la humedad promedio de la cama con el tiempo, ver figura 8.14.

8.3 Simulación Solar

Para demostrar la utilidad del programa de computadora en el diseño de un secador solar de granos, se optó por efectuar una simulación para el estado de Veracruz que es el segundo productor de maíz de la República después de Jalisco. El secador operaría entonces en condiciones adversas puesto que la humedad relativa promedio para esa región es alta. Se recopilaron los datos geográficos y meteorológicos del área de Tuxpan, Ver. a una temporada de cosechas; siendo éstos los siguientes:

Fecha: 1° de Noviembre, día no 312

$$T_{máx} = 29.6°C, \qquad \bar{T} = 25.0°C, \qquad T_{mín} = 19.4°C$$

humedad relativa promedio: 70 por ciento

Presión barométrica: 760 mm de Hg = 14.504 psi

Latitud: 21.2 °N

Promedio de radiación total diaria: 280 ly

Fracción de radiación directa y difusa: 0.6 y 0.4 respectivamente

Humedad inicial del grano: 25 por ciento (b.h.)

Para controlar el número de horas de operación del ventilador, se define la humedad relativa máxima en el plenum. Al aumentar dicho límite, el número de horas de operación será mayor. Para el caso especificado, si la humedad relativa máxima es 60 por ciento, el ventilador opera en promedio 6 horas por día; y para 80 por ciento opera en promedio 8 horas por día. Se observó que mientras más tiempo opera el ventilador más pronto se abate la humedad del último estrato. Esto se explica al analizar el listado de resultados obtenido. Durante las horas de mayor radiación, la humedad relativa es baja, en consecuencia los granos en los estratos inferiores llegan a sobresecarse de suerte que, cuando la humedad relativa es alta, dichos granos se rehumedecen, lo que permite el secado de los estratos superiores. Los mismos granos actúan entonces como un almacén de energía del sistema y se aprovecha al máximo la energía solar disponible.

En las páginas 62-63 se muestra el listado de resultados obtenidos para un espesor de cama de granos de 0.5 m, para el cual el gasto óptimo es de 325 kg hr^{-1} m^{-2}.

En la figura 8.15 se presentan dichos resultados en forma gráfica. Asimismo, se obtuvieron resultados para 1m y 1.5 m de espesor de la cama. Para analizar afectivamente las opciones, se supone una capacidad requerida de almacenamiento de 50 toneladas. El grano de maíz con 25 por ciento de humedad (b.h.) tiene una densidad de 653.5 kg m^{-3} (ver fi

gura A.1.5), requiriéndose entonces 76.5 m^3 para el almacén.

De la información presentada y los listados obtenidos del programa se obtiene la siguiente tabla comparativa:

1.	Espesor de la cama	m	0.5	1.0	1.5
2.	Gasto óptimo	kg hr^{-1} m^{-2}	325	750	1200
3.	Humedad promedio final (b.h.)	por ciento	11.4	12.5	12.1
4.	Area de la cama	m^2	153.0	76.5	51.0
5.	Area de captación†	m^2	164.1	82.1	109.4*
6.	Potencia específica	kW m^{-2}	0.019	0.245	1.130
7.	Potencia requerida	kW	2.9	18.7	57.6
8.	Tiempo de operación	hr	48	48	44
9.	Energía consumida por el motoventilador	kW-hr	139.2	897.6	2 536.1

* En este caso se duplicó el área de captación para obtener un abatimiento suficientemente alto de la humedad relativa, del orden de 7 por ciento en promedio.

Se observa que al incrementar el espesor de la cama y en consecuencia el gasto necesario, la potencia requerida por el motoventilador aumenta considerablemente. Mediante las líneas 4,5,7 y 9 se pueden determinar los costos iniciales y de operación para las alternativas de diseño, y seleccionarse aquella que resulte más económica. De acuerdo con un análisis económico preliminar el espesor de la cama de 1 m parece ser la alternativa más atractiva ya que requiere el área mínima de captación sin incurrir en un consumo excesivo de energía.

---

† área de captación = área de la cama / cos δ

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A la luz de los resultados obtenidos de la correlación teórico-experimental, se puede concluir que el modelo matemático desarrollado predice adecuadamente el proceso de secado para una cama de granos. Con base en conceptos básicos se ha integrado un programa de computadora que resulta una herramienta útil para el diseño de secadores solares de granos. Al haber seguido este método en vez de una metodología puramente empírica se podrá mejorar el modelo a medida que se adquiera un entendimiento más profundo del problema.

Para fines de diseño, el concepto de la difusividad aparente resulta ser la clave que liga el conocimiento teórico con las condiciones y parámetros que se encuentran en un proceso real de secado. Aunque se hizo énfasis sobre el secado de maíz, tanto el modelo matemático como el modelo de calibración de la difusividad aparente, son adaptables a cualquier tipo de grano o bien cualquier producto que se pueda deshidratar.

En el secado de granos, el parámetro de diseño más importante es el gasto de aire. Mientras dicho parámetro esté dimensionado por el volumen del producto a secar, se tendrá un secado satisfactorio. Sin embargo, puesto que la potencia requerida por el motoventilador crece exponencialmente a medida que se incrementa la profundidad de la cama, cuando la humedad del grano cosechado es alta se debe limitar la altura a no más de un metro. Cuando la humedad inicial está cerca de la óptima para cosecha se podrán tener profundidades mayores, lo que implica un menor costo inicial del diseño, sin incurrir en un costo de operación demasiado alto.

En todos los casos se observó un sobresecado de los estratos inferiores lo cual acarrea una disminución de los beneficios debida a la pérdida de peso a la venta. Para compensar tal pérdida, el programa podrá investigar la política de operación del motoventilador, ya que con una operación continua se incurre en una rehumidificación de los estratos inferiores lo que permitiría el secado de las capas superiores durante la operación nocturna. Se mantiene entonces un secado más uniforme para la cama, pero se incrementan los costos de operación. Para tal caso se debe determinar el área de captación óptima de tal suerte que el tiempo total de operación del motoventilador dé un costo total mínimo. Se hace notar que para tal análisis las predicciones de rehumidificación del grano no serán precisas debido al efecto de histérisis.

Para determinar las limitaciones del secado solar, los lugares donde es aplicable y sobre todo el gasto óptimo de operación, es necesario efectuar un análisis con base en la probabilidad de eventos meteorológicos.

Para ello se debe disponer de un banco de datos para las diferentes localidades donde el secado sea necesario, del orden de diez años mínimo. Se podrá obtener entonces una carta de la República indicando los gastos mínimos de operación para secadores solares.

El diseño de diferentes tipos de captadores solares destinados al secado de granos debe ser estudiado con base en costos y funcionalidad con el fin de tener en un futuro no muy lejano, una producción en serie de secadores solares de grano cuya necesidad y urgencia no se podrán enfatizar lo suficiente.

Se deben estudiar otros tipos de granos y productos en el modelo de calibración con el fin de determinar cuales son susceptibles de ser secados con energía solar y determinar los beneficios obtenidos.

Finalmente, se debe seguir la investigación básica sobre el secado basado en el modelo de difusión para aclarar las lagunas existentes y explicar el comportamiento exhibido por la difusividad aparente durante el proceso de secado.

REFERENCIAS

1. VAN ARSDEL W.B., COPLEY, M.J., MORGAN, A.I. 1973
Food Dehydration
AVI Publishing Co. Westport, Conn.

2. BROOKER, D.B. 1967
Mathematical Model of the Psychrometric Chart.
Trans. of the ASAE 10 (4), 558-561

3. BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. 1974
Drying Cereal Grains
Avi Publishing Co., Westport, Conn.

4. BUELOW, F.W. 1961
Drying Crops with Solar Heated Air
Proceedings of the U.N. Conference on New Sources of Energy,
Solar 2, Cloudburst Press, Seattle, Wash.

5. CHITTENDEN, D.H., HUSTRULID, A. 1966
Determining Drying Constants for Shelled Corn.
Trans. of the ASAE 9 (1), 52-55

6. CRANK, J. 1956
The Mathematics of Diffusion
Clarendon Press, Oxford

7. DAVIS, C.P., LIPPER, R.I. 1961
Solar Energy Utilization for Crop Drying
Proc. U.N. Conference, Solar 2. Cloudburst Press, Seattle, Wash.

8. DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. 1974
Solar Energy Thermal Processes
John Wiley & Sons, New York

9. FERNANDEZ, Z.J.L., MUÑOZ G.F., GARIBAY, L.J., ZARATE, P.R. 1977
Secado Solar de Granos
Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F.

10. FERNANDEZ, Z.J.L. et al. 1977
Sobre el Secado Solar de Grano
Memoria del II Congreso de la AMIAC, Cuautepec, Mor.

11. FERNANDEZ, Z.J.L., MUÑOZ, G.F.
Simulación Numérica del Secado Solar del Maíz
Instituto de Ingeniería UNAM, México, D. F.

12. FLOOD, C.A., SABBAH, M.A., MEEKER, D., PEART, R.M. 1972
Simulation of a Natural Air Corn Drying System
Trans. of the ASAE 15(1), 156-159, 162.

13. FOSTER, G.H., PEART, R.M. 1976
Solar Grain Drying
Agricultural Research Service, Washington, D.C.

14. HANDY, M.V., BARRE, H.J. 1970
Analysis and Hybrid Simulation of Deep-Bed Drying of Grain
Trans. of the ASAE 13(6), 752-757

15. HAQUE, E., FOSTER, G.H., CHUNG, D.S. 1978
Static Pressure Drop Across a Bed of Corn with Fines
Trans. of the ASAE 21(5), 997-1000

16. HERNANDEZ, G.E. 1973
Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración
Limusa S. A., México, D. F.

17. INGRAM, G.W. 1976
Deep Bed Drier Simulation with Intra-Particle Moisture Diffusion
J. Agric. Engng. Res. 21(3), 263-272

18. KREITH, F. 1973
Principles of Heat Transfer, 3d. Edition
Intex Press Co., New York

19. LÖF, O.G. 1961
Use of Solar Energy for Heating Purposes: Solar Drying
Proc. U.N. Conference, Solar 2. Cloudburst Press, Seattle, Wash.

20. MITCHEL, R.L. 1970
Crop Growth and Culture
Iowa State Press, Ames.

21. RAMIREZ, G.M. 1966
Almacenamiento y Conservación de Granos y Semillas
Ed. Continental, México, D. F.

22. SHEED, C.K. 1953
Resistance of Grains & Seeds to Airflow
Agric. Engng. 34, 616-619

23. SHOVE, C.G. 1977
Agriculture and Energy, ed. por LOCKERETZ, W.
Academic Press, New York

24. STROHMAN, R.D., YOERGER, R.R. 1967
A New Equilibrium Moisture Content Equation
Trans. of the ASAE 10(5), 675-677

25. THOMPSON, T.L., PEART, R.M., FOSTER, G.H. 1968
Mathematical Simulation of Corn Drying - A New Modal
Trans.of the ASAE 11(4), 582-586

F I G U R A S

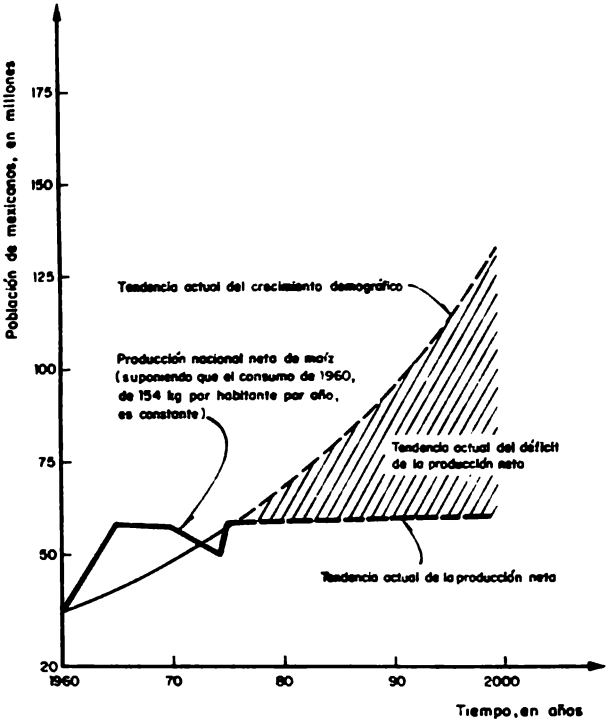
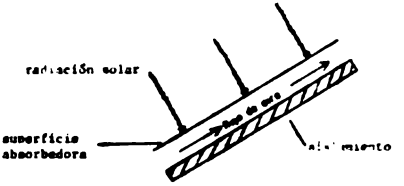


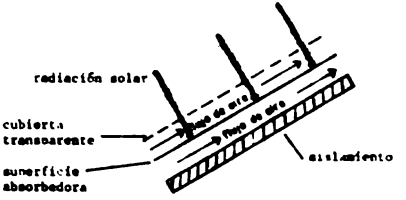
FIG 2.1.1. Crecimiento demográfico en relación con la disponibilidad real, o producción neta, del maíz en México

SISTEMA	aire frío	aire +comb.	aire +solar
VENTAJAS			
Costo de combustible = 0	sí	no	sí
No hay peligro de incendio	sí	no	sí
Bajo costo inicial equipo	sí	no	sí
Requiere poca supervisión	sí	no	sí
Puede secar grano muy húmedo	no	sí	sí
Proceso indep. cond. atmós.	no	sí	?
Corto tiempo de secado	no	sí	sí
Alta capacidad de secado por HP de ventilador	no	sí	sí
DESVENTAJAS			
Alto costo inicial equipo	no	sí	no
Costo de combustible	no	sí	no
Peligro de incendio	no	sí	no
Requiere constante supervisión	no	sí	no
Depende de cond. atmosféricas	sí	no	?
Largo tiempo de secado	sí	no	no
Peligro crecim. hongos, etc.	sí	no	no
No es posible operar continuam.	sí	no	sí

Fig 2.1.2 *Comparación cualitativa de los dos sistemas básicos de secado de granos con circulación forzada de aire, con respecto al sistema de secado solar con aire forzado. (Fuente: Departamento de Agricultura de los E.U.A.)*



a. Captador plano sin cubierta.



b. Captador plano con cubierta.

Fig 2.3.1 Esquemas de un colector solar plano sin cubierta (a) y con una cubierta transparente (b). En este último el flujo de aire circula por ambos lados de la placa absorbedora.

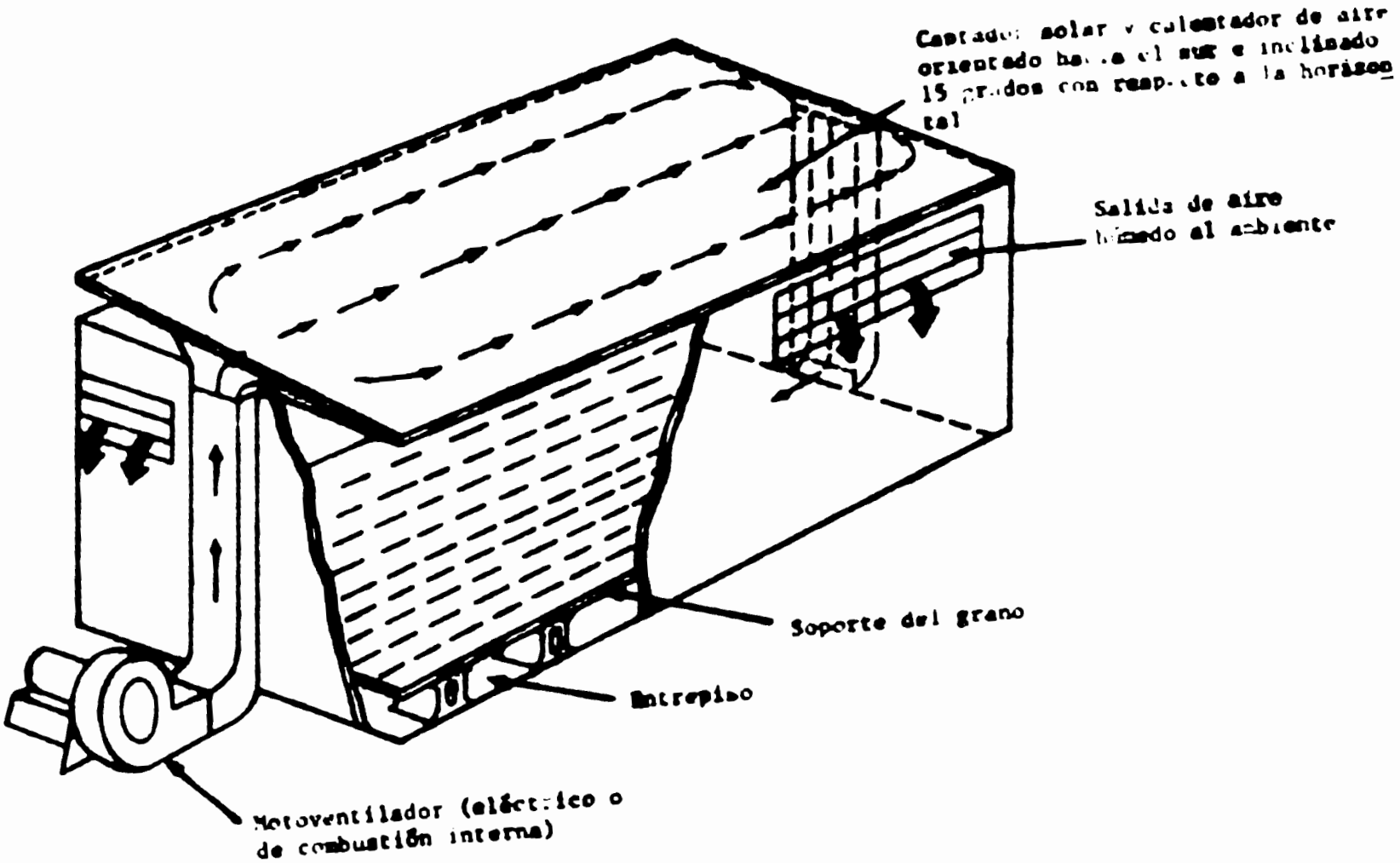
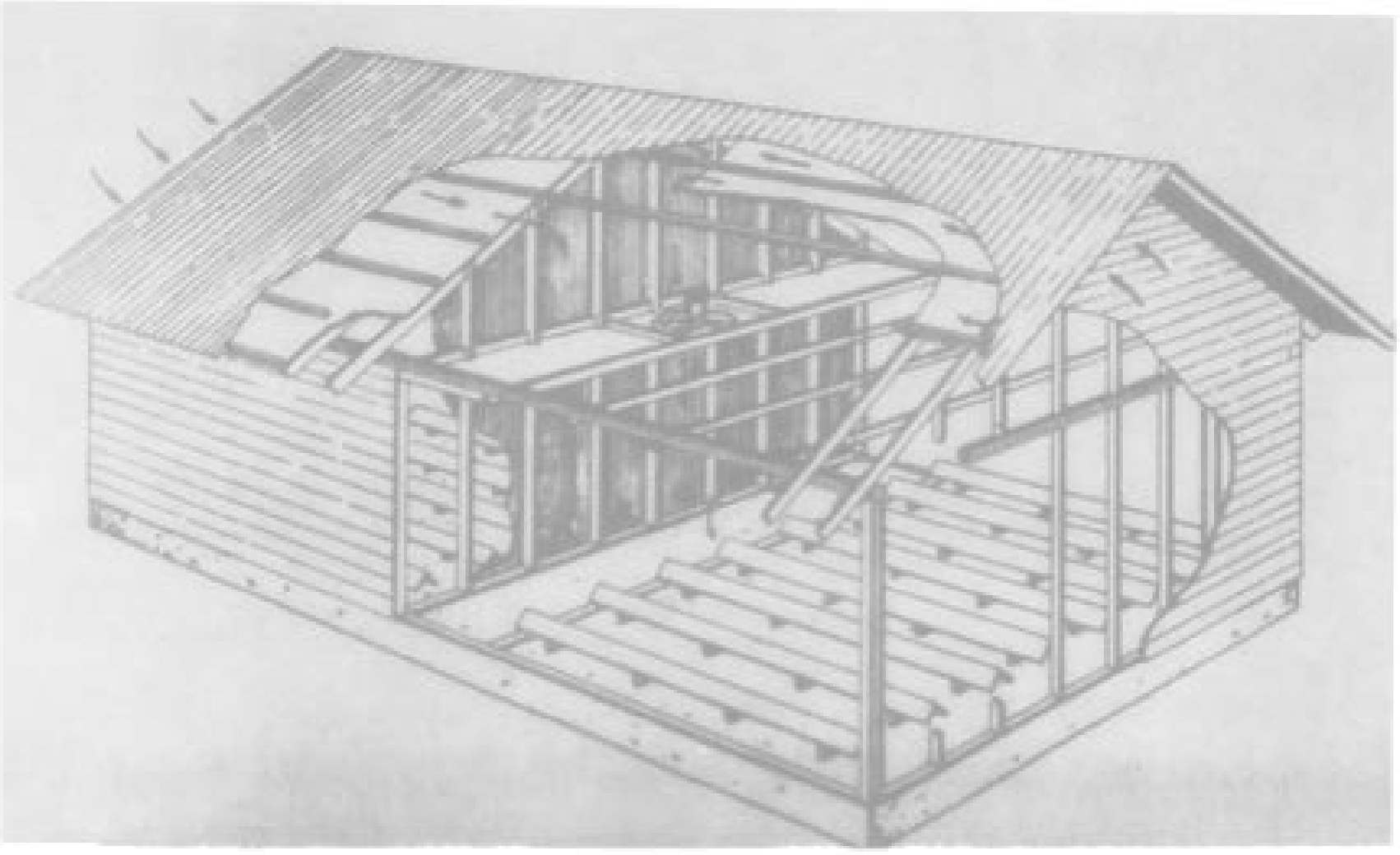


Fig 2.4.1 Almacén de granos convencional adaptado para operar como almacén-secador solar



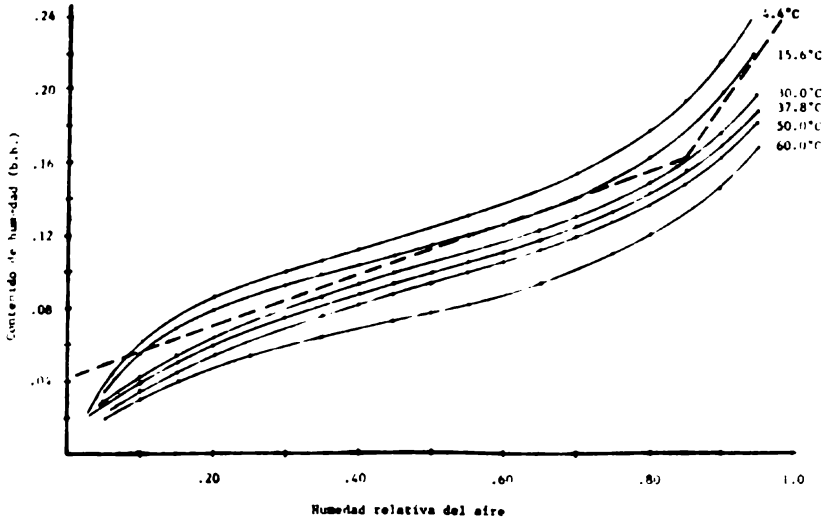


Fig 3.2.1 Curvas de humedad de equilibrio para el maíz (Rodríguez-Arias 1956), comparadas con la ecuación de Ramírez Genel (1966).

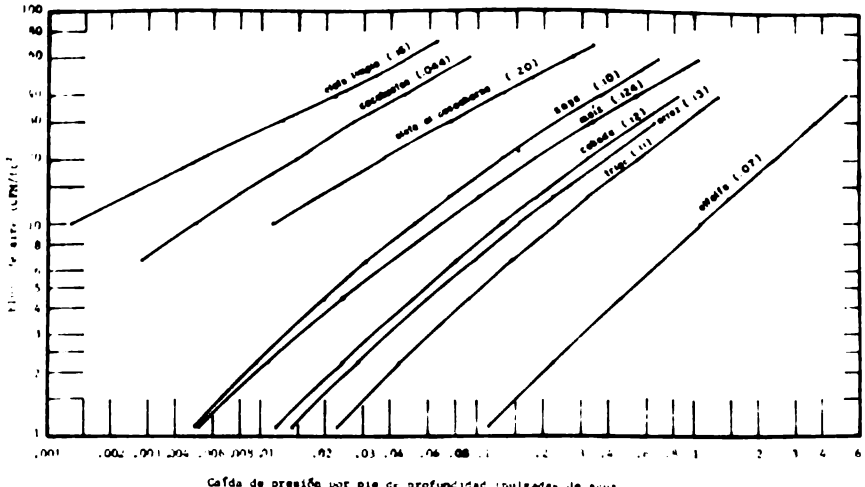
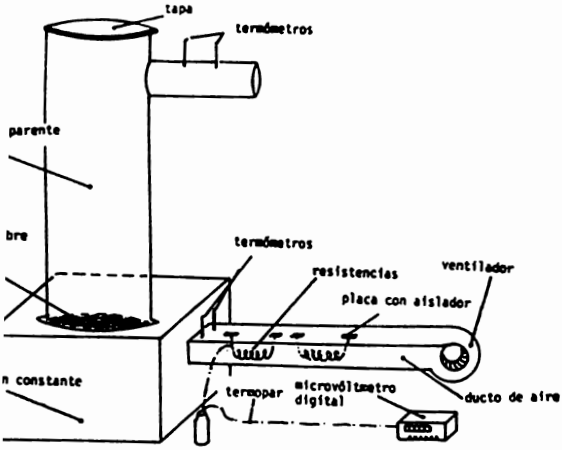


Fig 1.3.1 Resistencia de los granos y semillas al flujo de aire (Shedd, 1953).

NOTA: Los números entre paréntesis indican el contenido de humedad del producto en base húmeda.

Fig. 5.1.1 Fotografía del aparato de calibración de la difusividad aparente de materiales a secar con energía solar. El aparato consta de un cilindro transparente donde se colocan los materiales a secar, una caja de aire a presión constante (plenum), un ducto alimentador de aire donde se alojan calentadores eléctricos y el ventilador que proporciona el flujo de aire necesario.



5.1.2 Diagrama esquemático de las partes que componen el aparato de calibración para procesos de secado. El ventilador centrífugo proporciona aire para mantener presión constante en el plenum. Este aire se calienta por medio de las resistencias. Se ilustra la posición de los sensores de temperatura.

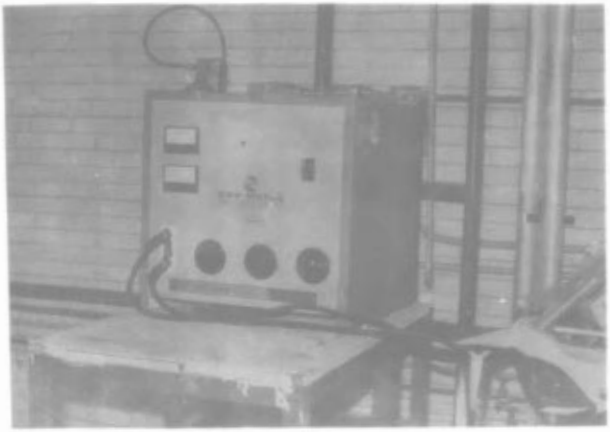


Fig. 4.1.3 Transformador rectificador empleado para suministrar una diferencia de potencial de 12 volts al moto-ventilador.

Fig 6.2.1 Para la calibración del anemómetro de termopar calentado, se tomaron lecturas de pulgadas de columna de agua mediante un tubo de Prandtl colocado en el ducto superior. El gasto se hizo variar mediante tapas de diferente apertura.

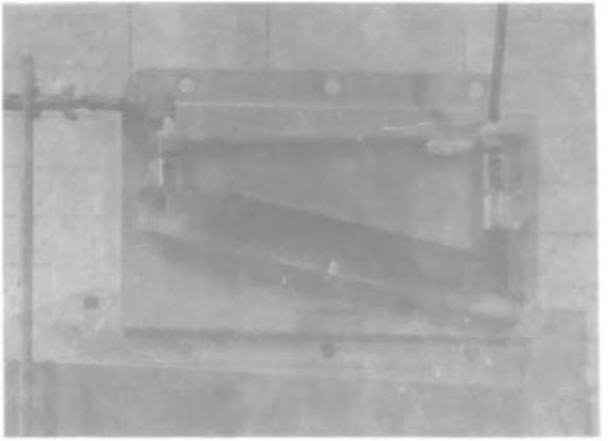


Fig 6.2.2 Piezómetro inclinado cuyo líquido manométrico es aceite y está provisto de una escala que convierte la presión medida en pulgadas de columna de agua. En la parte superior cuenta con un nivel que sirve de referencia para su colocación.

Fig 6.3.1 Medición de la altura de la cama de granos con objeto de determinar la variación volumétrica.

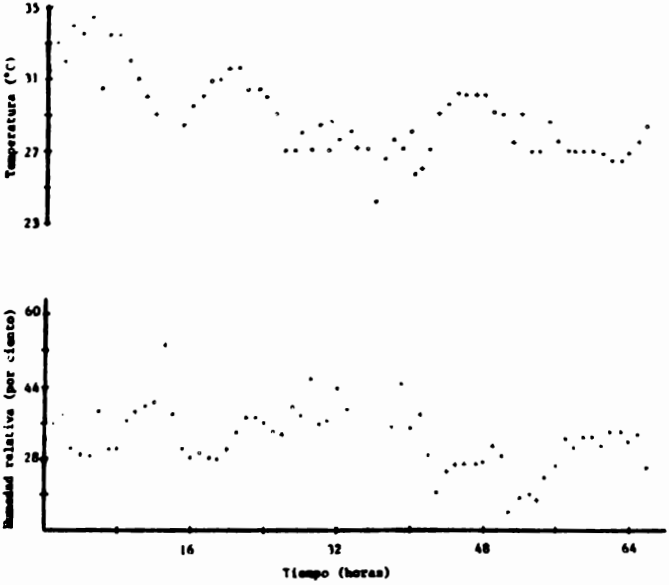


Fig 7.1 Caracteristicas psicrométricas del aire en el plenum durante la tercera prueba.

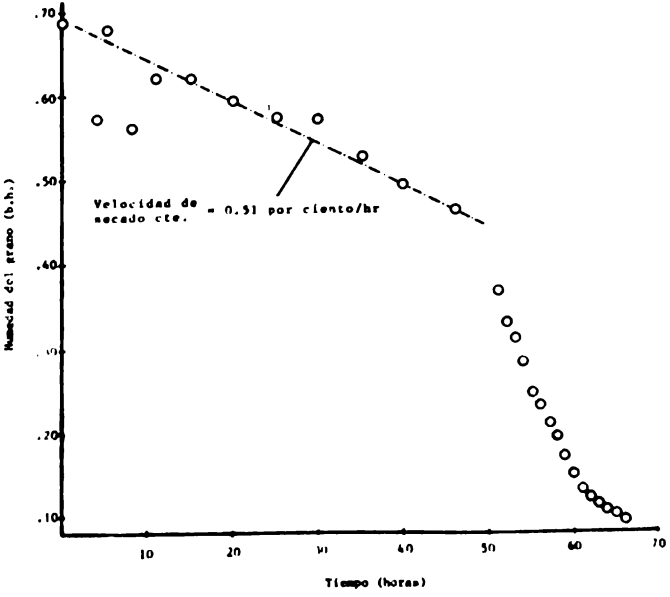


Fig 8.1 Variación temporal de la humedad del grano de maíz con peso inicial de 15 kg y espesor de la cama de 32 cms. Durante las primeras 50 horas se observa que la velocidad de secado es constante. Debido a ello el análisis se efectuó para las últimas 15 horas de la prueba.

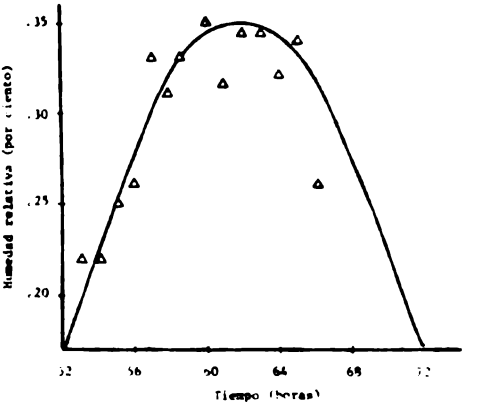
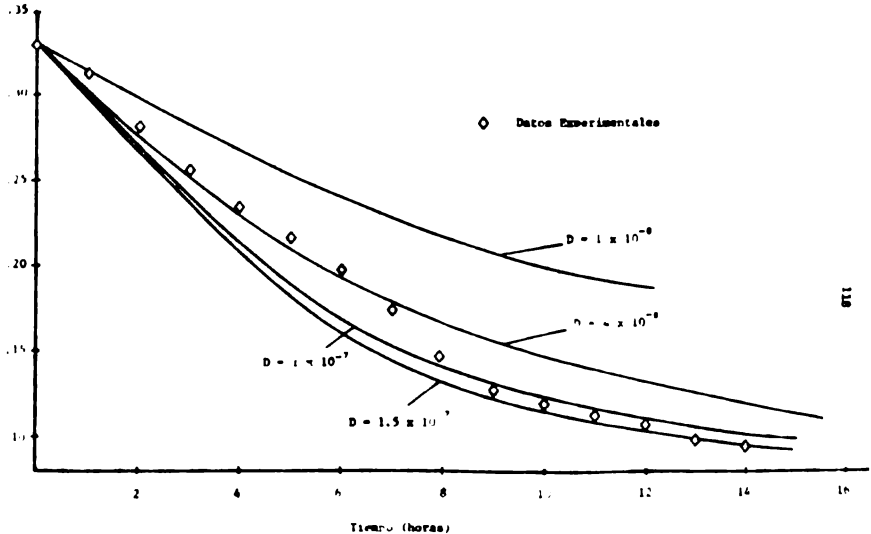


Fig 8.2 Variación de la humedad relativa del aire durante las últimas 15 horas. Con fines de simulación se ajustó la curva que se muestra en la figura cuya ecuación es:

$$Y = 18\,\mathrm{sen}\,9t + 1$$



g 8.3 Curvas teóricas de difusividad constante. El rango de valores de la difusividad aparente está definido por las curvas extremas que muestra la figura.

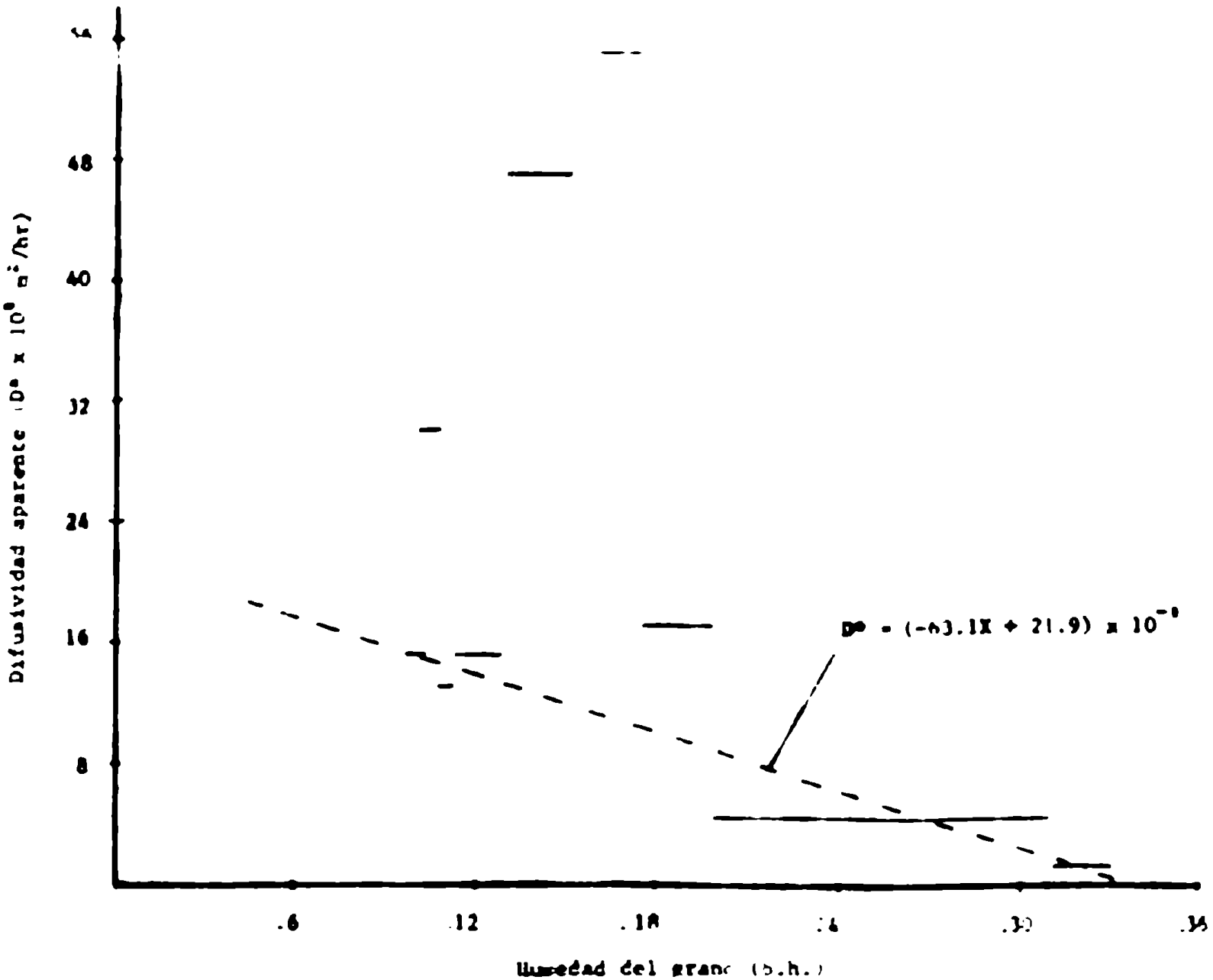


Fig 8.4 Los valores discretos que toma la difusividad aparente en los intervalos de humedad mostrados, se ajustan a los datos experimentales. La representación por medio de una recta resulta aceptable debido a la dispersión de los datos.

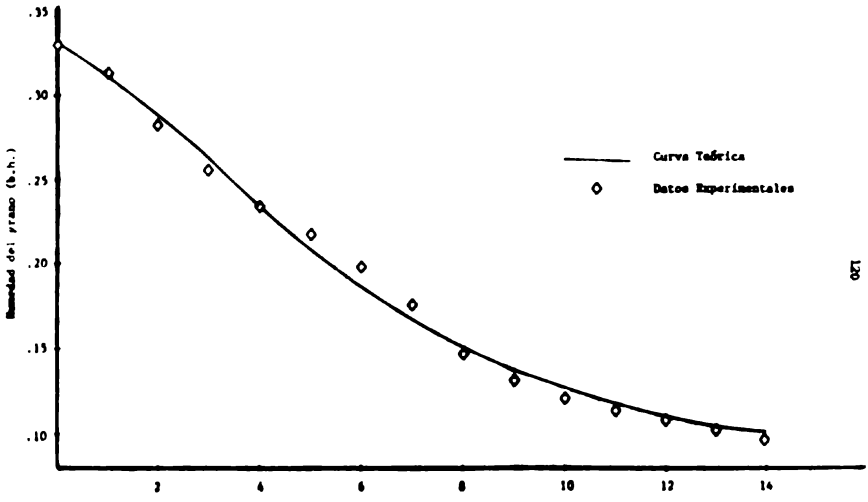


Fig 8.5 Correlación teórico-experimental. La curva continua representa la variación temporal de la humedad del grano considerando la relación obtenida para la difusividad aparente. La aproximación con el fenómeno real confirma la validez del modelo.

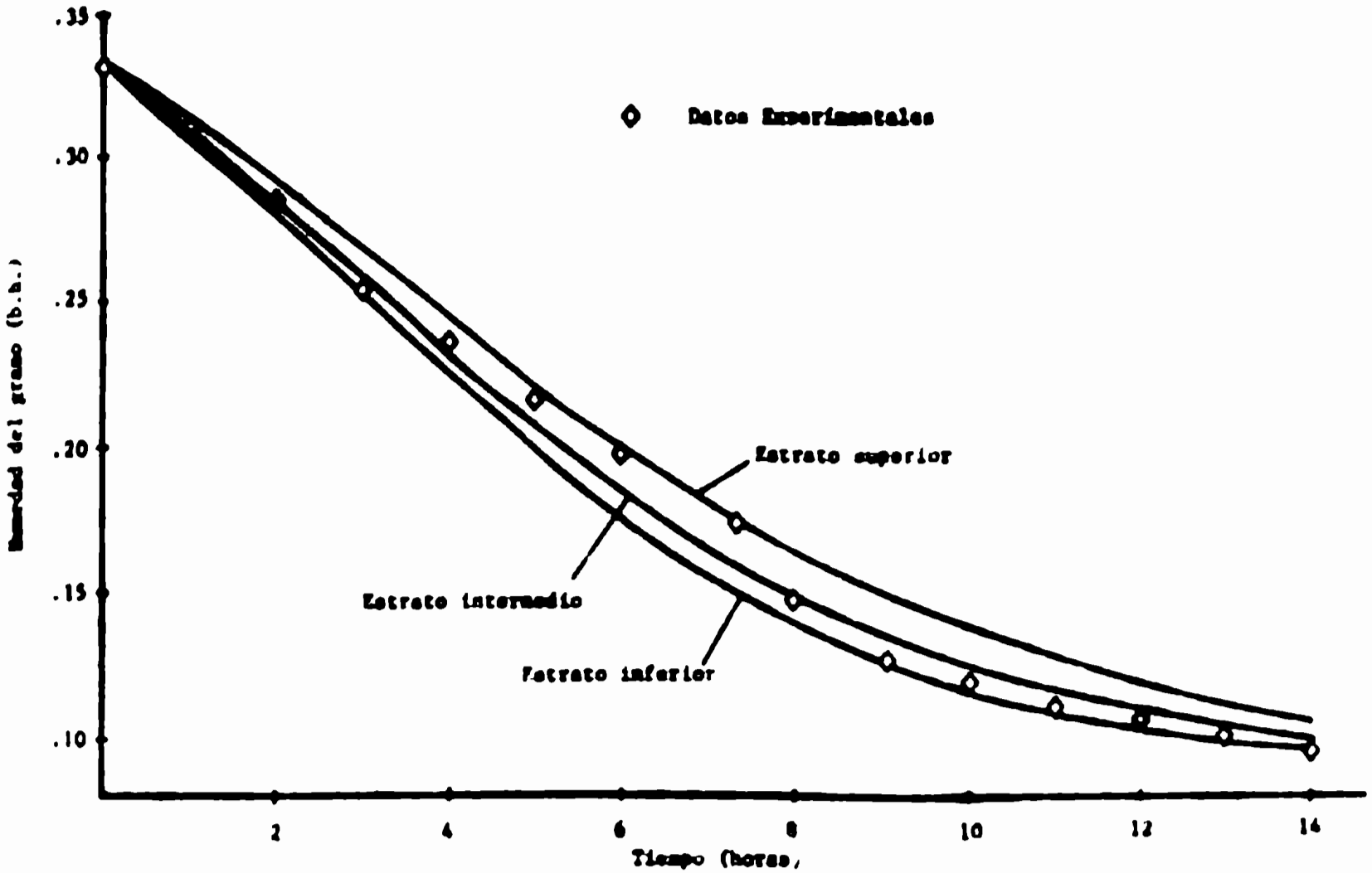


Fig 8.6 Variación de la humedad del grano considerando el secado por estratos. Las curvas se refieren al estrato superior, intermedio e inferior de la cama. Se observa que los puntos experimentales se encuentran dentro de la región definida por dichas curvas. Durante el intervalo de tiempo mostrado, el espesor de la cama varió de 16 a 10 cms.

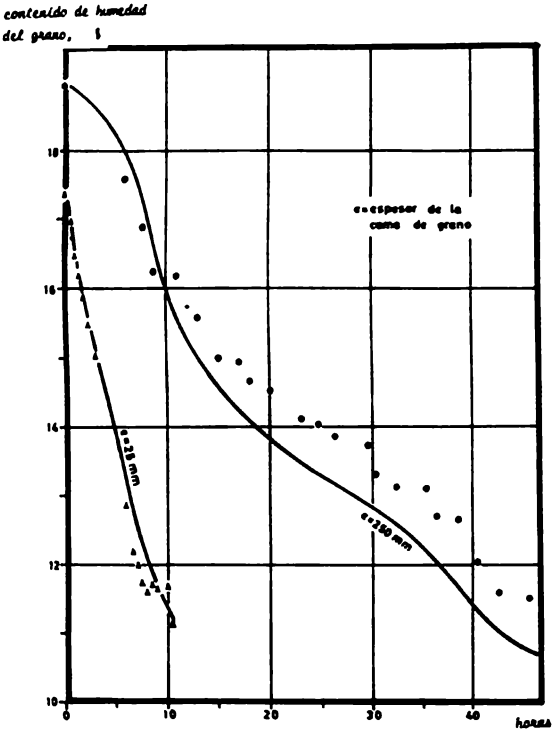


Fig 8.7 Correlación de los resultados experimentales y teóricos del tiempo de secado del grano, con espesores de cama de 25 y 250 mm. (Fernández et al 1977)

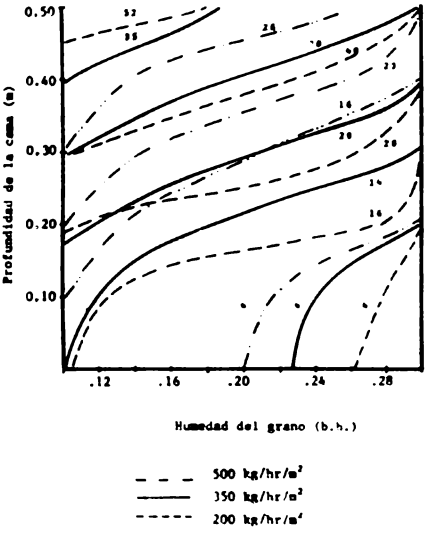


Fig 8.8 Variación de la humedad del grano a través de los estratos para diferentes gastos en diferentes tiempos. Humedad inicial 30 por ciento y profundidad de la cama 0.5 m.

El tiempo máximo de almacenaje para dicha humedad inicial del grano y 21°C de temperatura es de 3 días.

NOTA: Para las figuras 8.8 a 8.11, los números correspondientes a cada curva representan las horas de secado, considerando 10 horas de operación por día. Las condiciones del aire en el plenum son: Temperatura = 35°C, y humedad relativa = 30 por ciento.

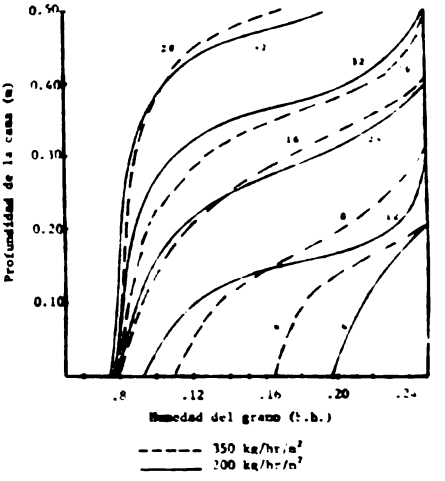


Fig 8.9 Variación de la humedad del grano a través de los estratos para diferentes gastos en diferentes tiempos. Humedad inicial 25 - por ciento y profundidad de la cama 0.5 m.

El tiempo máximo de almacenaje para 25 por ciento de humedad inicial del grano y 21°C es de 5 días.

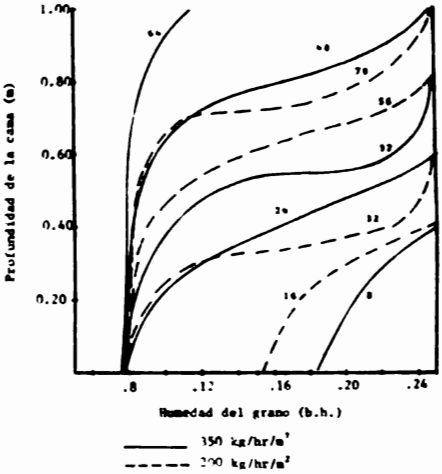


Fig 8.10 Variación de la humedad del grano a través de los estratos para diferentes gastos en diferentes tiempos cuando la humedad inicial es de 25 por ciento y el espesor de la cama es 1 m.

El tiempo máximo de almacenaje para 25 por ciento de humedad del grano y 21°C es de 5 días.

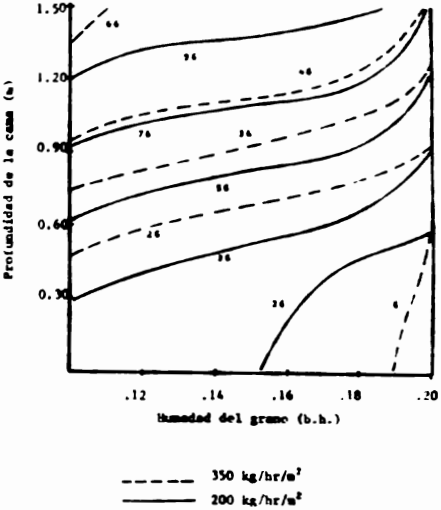


Fig 8.11 Variación de la humedad del grano a través de los estratos para diferentes gastos en diferentes tiempos cuando la humedad inicial es de 20 por ciento y el espesor de la cama es 1.5 m.

El tiempo máximo de almacenaje para 20 por ciento de humedad inicial del grano y 21°C es de 16 días.

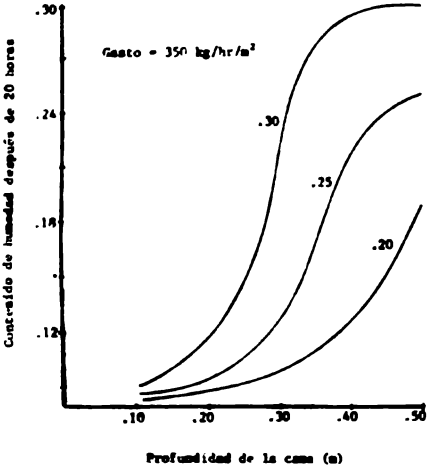


Fig 8.12 Efecto del contenido de humedad inicial (números correspondientes a cada curva) en el perfil de humedades a través de la cama de granos, para un tiempo de secado de 20 horas. Se observa que el frente de secado avanza más rápidamente cuando la humedad inicial es baja.

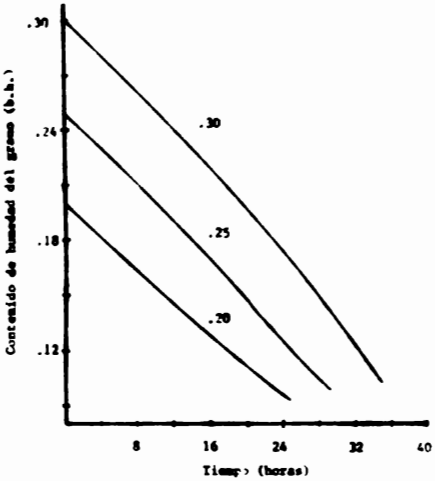


Fig 8.13 Efecto del contenido de humedad inicial en la variación temporal de la humedad promedio de la cama de granos.

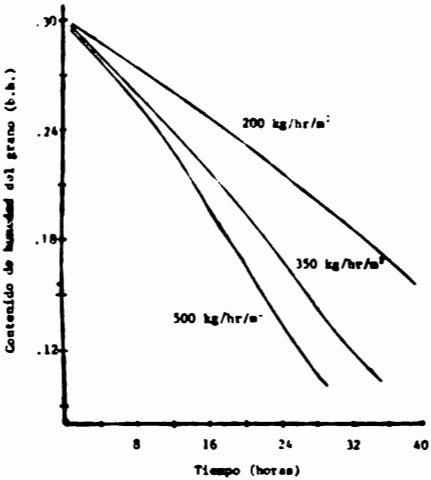


Fig 8.14 Efecto del gasto de aire en el contenido de humedad de una cama de maíz con profundidad de 0.5 m, considerando la variación en el tiempo. La rapidez de secado aumenta al incrementarse el gasto de aire.

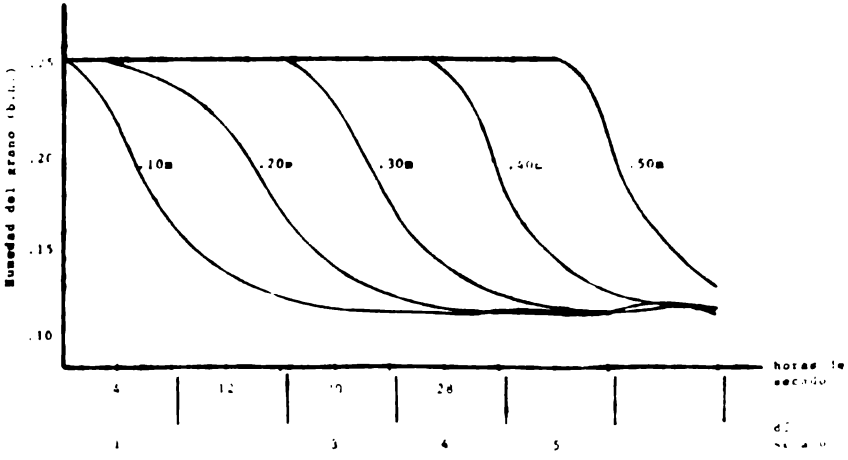


Fig. 8.15 Simulación del secado solar por paratos de una capa de granos de maíz de 0.5 m de espesor, gasto de aire de 325 kg/h m², datos meteorológicos, geometría del grano se constan... 10 a 32 h. ... el abatimiento de humedad en el último estrato ocurre durante ... 9° día, verificándose el decremento de 1 a 5 días.

INDICE DE APENDICES

A1. CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DEL MAIZ 132

A2. METODOS DE DETERMINACION DE LA HUMEDAD DE LOS GRANOS 145

A3. EVALUACION DE LAS CARACTERISTICAS PSICROMETRICAS DEL AIRE DURANTE EL PROCESO DE SECADO 154

A4. PRUEBAS PRELIMINARES 158

A5. PRECISION DE LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES 170

APENDICE 1. CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DEL MAIZ

Cada grano de maíz está envuelto por una capa delgada llamada pericarpio bajo la cual se encuentra la cubierta de la semilla. El flujo de humedad proveniente de varias partes de la semilla tiene lugar debajo de otra capa interior llamada aleurona que forma parte del endosperma[1] fig A.1.1.

Las características interiores que presenta cada semilla como lo es la permeabilidad de la aleurona y del pericarpio, y los deterioros de dichas capas, son factores que influyen en el flujo de humedad.

Para evitar condiciones propicias al desarrollo de insectos y hongos que dañan las cosechas, es necesario reducir el contenido de humedad del grano.

La madurez fisiológica del grano es el punto de referencia que se considera para determinar el momento en que se debe realizar la cosecha, pues en ese momento se obtiene la mayor cantidad de utilidad de material seco en la semilla.

La relación de humedad en el grano[20] se muestra en la tabla A1.1.

	Polinización	Madurez fisiológica	Madurez de cosecha	Almacenaje
Contenido de humedad	90	30-40	16-28	13-14

Tabla A1.1 Relación de humedad en el grano

Por lo que respecta al maíz, los promedios diarios de reducción de humedad en el grano, varían considerablemente de cosecha a cosecha dentro de cada una de las 5 fases de maduración de la semilla. Cuando el contenido de la humedad en el grano está por arriba del 30 por ciento, la reducción de humedad está fuertemente ligada con la temperatura del aire; por debajo de este porcentaje, la humedad relativa, la depresión del bulbo húmedo y el déficit de saturación del aire son los parámetros predominantes en dicha reducción.

El rango de contenido de humedad alrededor del valor promedio aumenta conforme se va secando el grano, como se ve en la fig A1.2.

El contenido de humedad que se recomienda para un almacenaje seguro del grano, varía con la especie. En la tabla A1.2 se muestran algunos tipos de cereales y los rangos de humedad recomendables.

Cereal	Máximo durante cosecha	Optimo en cosecha para pérdidas mínimas	Usual al cosecharse	Requerido para almacenaje seguro para 1 año	Para 5 años
Cebada	30	18-20	10-18	13	11
Maíz	35	28-32	14-30	13	10-11
Avena	32	15-20	10-18	14	11
Arroz	30	25-27	16-25	12-14	10-12
Centeno	25	16-20	12-18	13	11
Sorgo	35	30-35	10-20	12-13	10-11
Trigo	38	18-20	9-17	13-14	11-12

Tabla A1.2 Contenido de humedad durante la cosecha y para almacenaje seguro (B.H) C.W. Hall (1975); D.W. Hall (1970); Metz (1970); Sinha (1973)

Si el grano se encuentra más húmedo, (por encima de los rangos mencionados), la producción total disminuye debido a que los aparatos convencionales utilizados para realizar la cosecha los dañan.

Cuando el contenido de humedad está por debajo del recomendado, ocurre agrietamiento del grano y daño debido a una larga exposición al clima del grano fragilizado.

De lo anterior surge la necesidad de secar el maíz hasta los niveles mencionados. El hecho de secar solo el grano y no el olote se debe a que este último se seca más lentamente[19]. Cuando el grano se encuentra con una humedad entre el 20 y 21 por ciento, el olote está entre

36 y 40 por ciento; en esas condiciones, el promedio para el elote es 24-25 por ciento. El grano y el olote tienen el mismo contenido de humedad en 13 y 64 por ciento; entre este rango, el olote tiene más humedad, y por debajo de él, la humedad del grano es mayor. La máxima diferencia es cuando el grano se encuentra a 27 por ciento de humedad, pues el olote está 23.5 por ciento más húmedo. En la figura A.1.3 se aprecian estos valores.

El punto en el cual el grano conserva satisfactoriamente sus condiciones estructurales cuando es removido del olote, se conoce como madurez de cosechado. En este punto el rango de humedad se encuentra entre 26 y 28 por ciento. Si se comparan las pérdidas de cosechado con las que se tienen al cosechar el grano con menor humedad, vemos que se pueden reducir en gran proporción como se ilustra en la fig A.1.4.

El peso de un volumen dado de grano húmedo se ve afectado con el cambio de humedad. En la fig A.1.5 se muestra dicho efecto en varios tipos de grano.

OTRAS CAUSAS DE DETERIORO DEL GRANO

La infestación en el campo por insectos perjudiciales en cultivos cuya cosecha se va a almacenar como grano, es de primordial importancia por la influencia que tiene en el manejo y conservación de los granos. Un ambiente propicio para su desarrollo, es aquel en el cual la temperatura se encuentra entre 85 y 90°F. Por debajo de los 70°F se reduce el crecimiento y la reproducción de muchos insectos, mientras que para tem

peraturas inferiores a 50°F muchas especies morirían.

Por lo general, los insectos no se desarrollan en granos cuya humedad relativa es menor al 14 por ciento.

Cabe hacer notar que en el momento de almacenar el grano, éste parece libre de insectos debido a que su presencia pasa inadvertida durante los primeros meses, ya que su desarrollo larvario y pupal se efectúa dentro de los granos. Estos insectos se reproducen rápidamente y perjudican al grano en forma considerable en poco tiempo.

Algunas recomendaciones para el control de insectos son las siguientes: limpiar y fumigar los almacenes por lo menos dos semanas antes de depositar el grano; almacenar el grano con bajo contenido de humedad; fumigar el grano dentro de las dos semanas siguientes a su almacenamiento para matar la infestación interna (en granos para consumo pueden utilizarse insecticidas de origen vegetal o fumigantes que no dejen residuos tóxicos); inspeccionar el grano en intervalos frecuentes (cada treinta días), y fumigar inmediatamente si se encuentran insectos.

Otra fuente que produce pérdidas en la calidad y cantidad del grano durante su almacenaje es la presencia de hongos. Ninguna especie se desarrolla abajo del 60 por ciento de humedad relativa de equilibrio del ambiente.

El efecto de contenido de humedad y temperatura en el desarrollo de los hongos en maíz almacenado se muestra en la tabla A1.3.

Temperatura del aire para almacenaje (°C)	Contenido de humedad (b.h.) 15	20	25	30
23.9	116	12	4	2
21.1	155	16	5	3
18.3	207	21	7	4
15.6	259	27	9	5
12.8	337	35	12	7
10.0	466	48	17	10
7.2	726	75	27	16
4.4	906	94	34	20
1.7	1,140	118	42	25

Tabla A1.3 Período de almacenaje seguro[1] para el maíz (en días) como función del contenido de humedad y la temperatura. (Criterio: desarrollo de CO_2; pérdidas de material seco < 1.0%).

[1] Los tiempos dados son aquellos en los cuales la pérdida en calidad del maíz trae consigo una baja en grado. No se debe inferir que el maíz almacenado entre estos límites no sufrirá pérdidas en calidad.

El control de los hongos puede llevarse a cabo por medios químicos o físicos. Una de las sustancias utilizadas para prevenir su desarrollo es el ácido acético. Hay que tener en cuenta que el inconveniente de este medio de prevención radica en la toxicidad de las sustancias, lo cual reduce la disponibilidad del grano para consumo humano.

No todas las pérdidas en el grano almacenado provienen del exterior. Resulta que debido a que el grano es materia orgánica, éste respira provocando disminución de material seco por la formación de bióxido de carbono. Además de la respiración del grano, ciertos hongos pro

sentes en él también realizan dicha función, y estudios realizados por Hummel[1] demuestran que el calor desarrollado en el grano húmedo durante la respiración proviene en su mayor parte por la acción de los hongos y no del grano mismo.

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es el poder germinativo de la semilla, ya que éste se ve afectado durante la cosecha, manejo y almacenamiento del grano. Cuando el grano en el campo es expuesto a condiciones climatológicas severas o cuando las semillas se encuentran quebradizas, los hongos afectan las propiedades germinativas de éstas. Los daños después de la cosecha pueden minimizarse mediante un secado y un almacenaje apropiado de la semilla. La temperatura de secado se debe mantener abajo de cierto límite para evitar daño en la capacidad de germinación.

Si el grano se almacena durante largos períodos a una temperatura de 125°F o más, el poder germinativo disminuye aún cuando el contenido de humedad sea bajo. Generalmente la temperatura del aire de secado debe mantenerse abajo de 110°F.

En lo que sigue, se toma como referencia la temperatura del aire en los granos para fines prácticos, ya que de hecho, debería considerarse la temperatura del grano. Cuando éste es destinado para procesos industriales, la temperatura no debe pasar de 130 - 140°F, pues la separación del almidón y el gluten se vuelve muy difícil por métodos estándar de centrifugación. El grano destinado a forraje puede secarse hasta 190°F sin aparente riesgo de reducción en el contenido proteínico.

Se ha comprobado que las semillas almacenadas bajo condiciones tropicales pierden su poder germinativo en plazos relativamente cortos. Con el propósito de determinar algunos factores importantes en el almacenamiento de grano en lugares húmedos, se realizaron pruebas en el Estado de Veracruz tomando en cuenta el tipo de envase y la humedad del grano para determinar como ésta influye en el poder germinativo de la semilla[†]. Se utilizaron dos almacenes, uno de los cuales permitiría el control de humedad y temperatura exterior. Al iniciarse la prueba, la germinabilidad del maíz utilizado era de 95 por ciento. Los resultados de dicha prueba se muestran en el cuadro No 1.

Contenido inicial de agua en el grano	Tipo de envase**	Tiempo en semanas humedad relativa no controlada	controlada
8	1	20	40
	2	36	36
	3	22	Alta***
	4	20	Alta
12	1	22	Alta
	2	30	32
	3	22	Alta
	4	28	36
16	1	15	32
	2	12	8
	3	15	32
	4	12	36

Cuadro 1. Tiempo de exposición en semanas para que el poder germinativo del maíz H-503* almacenado con diferentes humedades iniciales y en diferentes tipos de envases, disminuya a 85 por ciento o menos. Cotaxtla, Veracruz, 1957-1958.

* 95 por ciento, germinación inicial
** 1 = Bolsas de manta
2 = Bolsas de manta y plástico (bolsa de plástico interior)
3 = Bolsas de papel reforzado (3 capas)
4 = Bolsas de papel reforzado (2 capas, la interior asfaltada)
*** Por ciento de germinación mayor de 85 al final de 68 semanas de observación.

† D. Barnes, D.L. Smith y Daniel Candia Z., Almacenaje de Maíz en el Trópico. Agricultura Técnica, Publicación.

También se determinaron los cambios en el contenido de humedad del grano para ciertos períodos de tiempo y en función de la humedad relativa del aire y el tipo de envase. El cuadro No 2 muestra estos resultados.

Porcentaje de humedad en el grano	Tipo de envase*	Humedad no controlada: Porcentaje de humedad en 3 meses	6	12	16	Humedad controlada: Porcentaje de humedad en 3 meses	6	12	16
8	1	13.1	13.3	12.8	12.3	8.7	8.7	8.5	9.1
	2	8.4	9.4	10.8	11.2	7.8	8.1	9.0	7.8
	3	12.7	13.2	13.0	11.9	8.5	8.6	9.5	8.8
	4	11.5	12.9	13.5	12.3	8.5	8.4	9.7	8.8
12	1	13.2	13.0	13.0	11.9	9.5	8.6	10.3	10.0
	2	11.5	12.4	12.1	12.3	11.4	10.7	10.0	10.0
	3	13.3	13.8	12.7	12.5	9.7	8.9	9.6	9.7
	4	13.2	12.8	13.2	12.8	9.7	9.0	9.7	9.6
16	1	13.7	13.4	13.4	12.2	9.6	9.0	9.7	9.4
	2	14.5	10.9	14.7	12.6	13.7	12.0	11.5	10.9
	3	13.4	13.8	13.4	11.8	9.7	9.1	8.8	9.8
	4	14.0	13.4	13.9	12.7	11.3	9.2	9.6	10.1

Cuadro 2 Cambios en el contenido de humedad del maíz después de 3,6, 12 y 16 meses de almacenamiento en relación con la humedad relativa del aire y tipo de envase.

* 1 = Bolsa de manta
2 = Bolsa de manta y plástico (bolsa de plástico interior)
3 = Bolsa de papel reforzado (3 capas)
4 = Bolsa de papel reforzado (2 capas, la interior asfaltada)

Un análisis de resultados llevó a la conclusión de que el sistema de almacenaje bajo humedad controlada, es un método económico, fácil y conveniente para preservar la germinación de maíz para semilla; el almace-

naje en bolsas de plástico bajo condiciones de humedad controlada, reduce el poder germinativo de las semillas en comparación con otros tipos de envase; sin recurrir al control de humedad, bolsas de manta con interior de plástico mantienen la germinación arriba del 85 por ciento después de siete meses para maíz con humedad inicial de 12 por ciento; cuando la humedad es controlada, el maíz con humedad inicial de 12 por ciento mantiene su poder germinativo arriba del 85 por ciento por un período de 16 meses si se almacena en bolsas de papel reforzado.

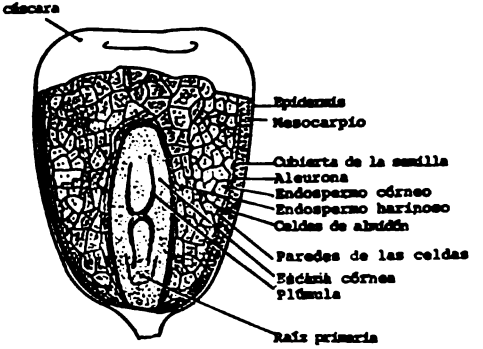


Fig A.1.1 Sección transversal de un grano de maíz

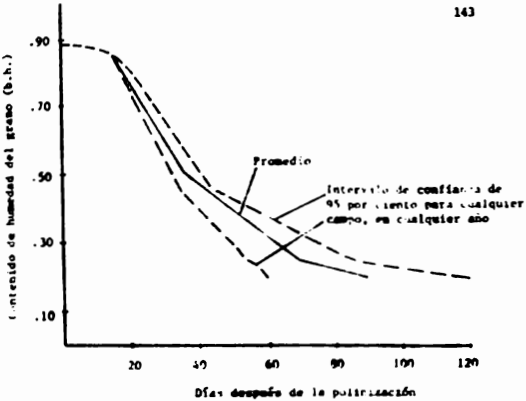


Fig A.1.2 Relación entre el contenido de humedad del grano de maíz en el campo y los días después de la polinización (Schmidt y Hallaver, 1966).

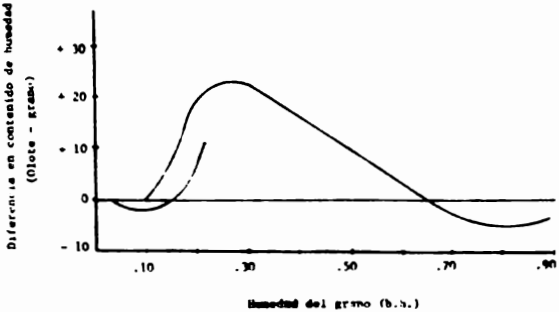


Fig A.1.3 Curvas descriptivas de la diferencia de humedad (b.h.) entre el grano y el olote (Miles y Remm

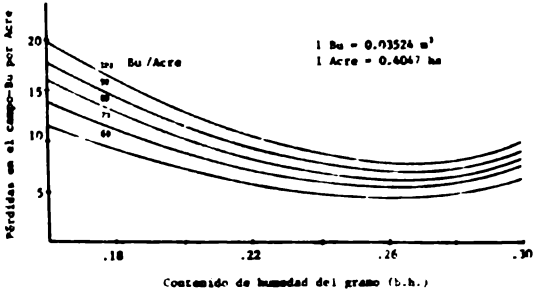


Fig A.1.4 Pérdidas durante la cosecha para diferentes niveles de rendimiento y contenido de humedad del grano (Van Fossen y Stoneberg, 1962).

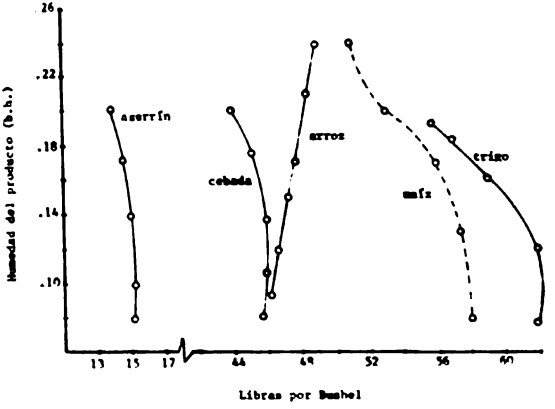


Fig A.1.5 Efecto de la humedad en el peso de los granos (Lorenzen, 1958).

NOTA: 1 libra/bushel = 12.8 kg/m³

APENDICE 2. METODOS DE DETERMINACION DE LA HUMEDAD DE LOS GRANOS

Con el objeto de obtener un resultado confiable en la determinación de la humedad del grano, es indispensable tomar una muestra lo más representativa del lote. Dicha muestra debe guardarse en contenedores metálicos estándar (latas herméticas) o en bolsas de plástico que cierren perfectamente.

Cuando la humedad a determinar está cerca del equilibrio con la atmósfera es preferible utilizar el grano molido.

Los métodos pueden dividirse en dos grandes grupos: directos o indirectos.

Entre los métodos directos se encuentran los siguientes[1,2]:

Método de horno o de estufa

La humedad se calcula tomando el peso de la muestra antes y después de secada. Así, el contenido de humedad se determina con base en la pérdida de agua. Los hornos empleados pueden ser calentados con aire caliente que circula en la camisa del horno o en paredes cerradas, o bien con agua caliente circulando entre dichas paredes. Cuando la humedad es muy alta se usa un método de dos etapas en el cual una muestra de grano entero se seca en el horno y luego de que es molida se vuelve a secar en el mismo horno.

Cuando se seca el grano entero, se colocan 30 gramos en el horno a 100 grados C durante 72 a 96 horas. El grano molido se usa en cantidades de 2 a 3 gramos y se seca a 130 grados C durante 1 ó 2 horas. Si se deja la muestra demasiado tiempo en el horno, el material orgánico se reducirá y la pérdida de peso se manifestará como pérdida de humedad, lo cual dará un valor incorrecto.

Método de horno de vacío

La muestra se muele y se calienta a 100 grados C con 25 mm de Hg de vacío durante 5 horas. Así con menos temperatura y durante menos tiempo, se reduce la posibilidad de determinar pérdidas de peso debido a deterioro del material seco.

Al determinar el contenido de humedad, hay que evitar que la muestra absorba humedad después de que se le ha removido. Para ello se coloca una cubierta de cristal sobre la muestra y el peso se mide después de que el contenedor y la muestra se han enfriado.

Método de destilación

En general para remover la humedad del grano por este método, se calienta el grano en aceite no volátil y el volumen o peso del agua, se condensa del va por desprendido de la muestra. Bajo este principio se utiliza el llamado Método de Brown y Duvel.

La destilación también se puede llevar a cabo con otras sustancias tales como el tolueno ($C_6H_5CH_3$). En las pruebas realizadas en el laboratorio, este fue uno de los dos métodos utilizados. A continuación se describe en detalle, ver figs A.2.1 - A.2.3.

Una muestra de 30 gramos se muele y se coloca en un matraz al que se agregan 100 ml. de tolueno. Sobre el matraz se encuentra una "columna de destilación" formada por un dispositivo que hace las veces de cambiador de calor y un tubo especial en el cual se depositan el agua y el tolueno condensados (fig. A.2.4). Dicho tubo graduado permite leer la cantidad de agua, ya que al ser ésta más densa que el tolueno, se deposita en el fondo del tubo. La razón de utilizar tolueno es que su punto de ebullición (111 °C) es mayor que el del agua, de manera que ésta se evapora primero. Para obtener un resultado confiable, la prueba debe durar aproximadamente cuatro horas.

Materiales desecantes

Este procedimiento consiste en colocar la muestra de grano molido en un espacio cerrado junto con un activo material desecante, de tal manera que la humedad del grano molido pase al desecante, hasta que se obtenga peso constante de la muestra en cuestión.

Métodos indirectos

Estos métodos involucran la medición de una propiedad del grano que depende del contenido de humedad. Para calibrar el método indirecto se requiere de uno directo. El resultado se expresa generalmente en base húmeda.

Resistencias eléctricas

La resistencia eléctrica o la conductividad eléctrica de un material orgánico depende de su contenido de humedad. Cuando se mide el contenido de humedad indirectamente, midiendo la resistencia eléctrica del material a una temperatura cualquiera, deben hacerse correcciones en pruebas realizadas a temperaturas diferentes de aquellas a las que fue hecha la calibración del aparato utilizado. Dado que los aparatos miden la humedad en la superficie del material considerado, cuando se utiliza aire seco la lectura es más baja que la humedad real; de igual forma, si la muestra se humedece superficialmente la lectura resulta más alta que la real.

Método dieléctrico

Las propiedades dieléctricas de los productos dependen del contenido de humedad. La capacidad de un condensador eléctrico es afectada por las propiedades dieléctricas del material colocado entre las placas del condensador. Bajo este principio funciona el aparato tipo Radson que se muestra en la figura A.2.4.

Su funcionamiento es como sigue: la carátula principal se coloca de manera que su "línea de balance" coincida con el indicador central; el interrup

tor de encendido se gira hacia la posición de balance y a su vez la perilla de balance se ajusta hasta que el punto del medidor de balance se encuentre en la posición central.

Se coloca el recipiente contenedor de maíz sobre el balancín y la muestra se vacía en él hasta que dicho balancín oscila libremente. Esta oscilación es detectada por el indicador que se encuentra en la parte superior del aparato. Posteriormente, esa cantidad de maíz se vierte por el "embudo" y queda depositada entre las placas del condensador.

Nuevamente se gira el interruptor de encendido, pero ahora hacia la posición de "ON" y se da vuelta a la carátula principal hasta que el medidor de balance está en la posición central. La carátula cuenta con varias escalas según el tipo de grano que se prueba. En el caso del maíz se tienen dos escalas; una de ellas detecta hasta 37 por ciento de humedad y la otra registra hasta 25 por ciento. Para utilizar la primera escala, se coloca un peso auxiliar en la base del contenedor y se vierte una muestra más pequeña.

Este aparato está diseñado para dar humedades precisas cuando la muestra está a 80 grados F (27 grados C). Si no se encuentra a esa temperatura, se utiliza un termómetro que se coloca en el grano y según la temperatura registrada, se suma o se resta una cantidad de humedad equivalente que se indica en una escala separada del aparato.

Fig A.2.1 Determinación de la humedad del grano utilizando el método de destilación con tolueno.

Fig A.2.2 Elementos necesarios en el proceso de destilación: balanza, mortero, matraz, probetas, parrilla, termómetro, columna de destilación y tolueno.

Fig A.2.3 El agua extraída del grano y el tolueno evaporado, se condensan en el "cambiador de calor" y se depositan en el fondo del tubo graduado. Debido a que la densidad del agua es mayor que la del tolueno y al ser no miscibles, existe un menisco de separación entre ambos líquidos como se aprecia en la fotografía.

Fig A.2.4 Método dieléctrico para determinar el contenido de humedad del grano mediante el "Radson". La carátula cuenta con diferentes escalas para varios tipos de grano. En la caja inferior se encuentra la escala de corrección por temperaturas.

APENDICE 3. EVALUACION DE LAS CARACTERISTICAS PSICROMETRICAS DEL AIRE DURANTE EL PROCESO DE SECADO.

Para determinar la humedad específica W en función de la humedad relativa Y, se considera un volumen arbitrario de aire V a una temperatura T, y se idealiza el comportamiento del aire como un gas ideal. Se tienen entonces las expresiones de la masa del vapor de agua y de la masa de aire:

$$m_v = P_v Y_v / R_v T$$
$$m_a = P_a Y_a / R_a T \qquad \text{(A.3.1.)}$$

Se tiene además:

$$V_v = V_a = V$$

$$P_b = P_v + P_a$$

Y por lo tanto:

$$W = \frac{m_v}{m_a} = \frac{R_a P_v}{R_v P_a} = \frac{R_a P_v}{R_v (P_b - P_v)} \qquad (A.3.3)$$

La humedad relativa se define por la expresión, $Y = P_v / P_{vs}$. La relación entre las constantes termodinámicas del aire y del vapor de agua es, $R_a/R_v = 0.622$.

$$\therefore \quad W = 0.622 \quad \frac{Y P_{vs}}{P_b - Y P_{vs}} \qquad (A.3.3)$$

La presión de vapor saturado es función de la temperatura y su variación se podrá determinar de la ecuación de Clausius-Clapeyron, que describe cómo varía la presión con la temperatura para un sistema de dos fases en equilibrio. De las relaciones básicas de la termodinámica se tiene:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{fg} = \frac{h_{fg}}{T\,(v_g - v_f)} \qquad (A.3.4)$$

Despreciando el volumen específico del fluido con respecto al del vapor, y considerando el comportamiento de este último como un gas perfecto,

$$\left(\frac{d P}{d T}\right)_{fg} = \frac{h_{fg}}{T(RT/P)}$$

$$\frac{d P}{P} = \frac{h_{fg}}{R} \quad \frac{d T}{T} \qquad (A.3.5)$$

Considerando que $h_{fg} = h_{fg}(T)$, e integrando la expresión descrita entre los límites respectivos, se obtiene:

$$P_{vs} = \text{Exp} \quad (54.6329 - \frac{12301.633}{T} - 5.16923 \quad \text{Ln } T) \qquad (A.3.6)$$

Para T expresada en °R y es válida para $32°F \leq T < 200°F$

Al efectuar el calentamiento del aire se considera que W permanece constante y puesto que la presión del aire seco no aumenta sensiblemente, se concluye que P_v también permanece constante. En consecuencia al calentar el aire ambiente de (Y_∞, T_∞) a (Y_o, T_o) se obtiene la expresión:

$$Y_\infty P_{vs} (T_\infty) = Y_o P_{vs} (T_o) \qquad (A.3.7)$$

$$Y_o = Y_\infty \frac{P_{vs} (T_\infty)}{P_{vs} (T_o)}$$

En un proceso adiabático a temperatura de bulbo húmedo constante, la variación del calor sensible es igual a la variación del calor latente. Se obtiene entonces del balance de energía,

$$(c_a + W c_v) (T_{bs} - T_{bh}) = h'_{fg} (W' - W) \qquad (A.3.8)$$

donde W' es la humedad específica para condiciones de saturación a T_{bh} ; y h'_{fg} el calor latente de vaporización del agua a T_{bh}. De las ecuaciones (1.3.2) y (A.3.2) se obtiene,

$$c_a \{1 + (\frac{P_v}{P_b - P_v}) \frac{R_a}{R_v} \quad \frac{c_v}{c_a}) \quad (T_{bs} - T_{bh}) =$$

$$h'_{fg} \frac{R_a}{R_v} \{ \frac{P'_{vs}}{P_b - P'_{vs}} - \frac{P_v}{P_b - P_v} \} \qquad (A.3.9)$$

donde P_{vs}' es la presión de vapor saturado a T_{bh}. La constante $\frac{R_a}{R_v}\frac{c_v}{c_a}$ tiene un valor 1.15577 pero para simplificar el cálculo se podrá considerar como unidad. Se obtiene entonces,

$$c_a\,(T_{bs} - T_{bh}) = 0.623\;\; h_{fg}'\;\; \frac{P_{vs}' - P_v}{P_b - P_{vs}'}$$

equivalente a,

$$P_{vs}' - P_v = \frac{c_a\,(P_b - P_{vs}')}{0.622\;\; h_{fg}'}\;\;(T_{bs} - T_{bh}) \qquad \text{(A.3.10)}$$

Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante son entonces rectas en la carta psicrométrica de pendiente,

$$-\frac{c_a\,(P_b - P_{vs}')}{0.622\;\; h_{fg}'}$$

que varía de acuerdo a T_{bh}.

Para fines de simulación y teniendo en cuenta la precisión requerida en la determinación de T_{bh}, se considera el valor de dicha pendiente constante K, reduciéndose la ecuación (A.3.10) a,

$$P_{vs}' - P_v = K\,(T_{bs} - T_{bh}) \qquad \text{(A.3.11)}$$

Para determinar T_{bh} y P_{vs}' conociendo T_{bs} y Y se recurre a un proceso iterativo empleando el método de Newton-Raphson para encontrar los ceros de funciones con las ecuaciones (A.3.6) y (A.3.11). Se podrán conocer entonces las condiciones de entrada a la cama de granos y se podrán evaluar las características variables del aire durante el proceso de secado.

APENDICE 4. PRUEBAS PRELIMINARES

Para la primera prueba se utilizaron dos baterías de doce volts cada una; con una de ellas se suministró corriente al ventilador y con las dos juntas se aplicaron 24 volts a las resistencias a fin de obtener mayor temperatura.

Se depositaron 6.8 kg de maíz dentro del cilindro y se inició la prueba el 25 de junio de 1979 a las 9:30 horas.

Se determinó la humedad inicial por el método de destilación, (ver apéndice 3) resultando de 61.66 por ciento y se llevó a cabo una primera etapa de secado de 5 horas, teniéndose que suspender debido a que las baterías se descargaron.

Mediante un cargador se logró dar a las baterías sus 12 volts originales después de un día de cargarlas.

El día 27 se prosiguió con el secado a partir de las 11:35 horas. Se apreciaba para ese momento un olor de descomposición y posible aparición de hongos, lo cual se debió a dejar tapado el cilindro de acrílico. A las 15 horas se suspendió la prueba debido a la franca descomposición del maíz.

SEGUNDA PRUEBA

Se volvió a desgranar maíz, esta vez 6.9 Kg. Respecto a las fallas detectadas en la primera prueba se decidió utilizar un transformador rectificador a fin de sustituir la batería que alimentaba al ventilador, puesto que era la que se descargaba más rápido. La otra batería se siguió usando para suministrar corriente a las resistencias. En esta forma, al descargarse la batería en uso, se sustituía inmediatamente por la otra y mientras se ponía a cargar. Haciendo uso nuevamente del método de destilación, se determinó la humedad inicial del grano, que resultó ser la misma: 61.66 por ciento.

La prueba se inició el día 2 de julio a las 18:00 horas. Durante cuatro horas se estuvo secando, teniendo ciertas variaciones en lo referente a gasto de aire (más adelante se muestra una tabla completa con los datos y resultados de la prueba). A las 22:00 horas se suspendió el proceso y se dejó destapado el depósito cilíndrico a fin de evitar la descomposición del maíz, como sucediera en la primera prueba.

Al día siguiente, 3 de julio, se continuó el secado a partir de las 13:15 horas. La nueva humedad registrada fue X_5 horas = 17.5/30 = 58.35 por - ciento. Después de nueve horas más de secado durante ese día, se volvió a suspender la prueba a las 12:10 horas.

El día 4 de julio se reinició la prueba a las 10:15 horas. Se habían cumplido hasta entonces 13 horas de secado y la humedad era de: X_{13} horas = 13.5/30 = 45.0 por ciento. A partir de la hora 18, se hicieron lecturas de humedad cada hora debido a que se había llegado al rango de trabajo del "RADSON". Antes no se hicieron lecturas sucesivas debido a que el método de destilación tarda alrededor de 3 horas y además las humedades eran aún grandes. Así en la hora 18, la humedad resultó 37.1 por ciento. Las demás lecturas aparecen en la tabla.

Con el fin de hacer comprobaciones se hicieron mediciones tanto por destilación como por "RADSON". En la hora número 27 el RADSON registró X = 16.0 por ciento. Por destilación se obtuvo X = 4.6/30 = 15.33 por ciento. Esta diferencia se puede deber a una mala calibración del RADSON, ya que por destilación el resultado es más preciso.

El 4º día se efectuó el secado durante 12 horas y se llegó a una humedad X = 19.2 por ciento (después de 25 horas de secado).

El 5 de julio se continuó a partir de las 12:30 y el proceso se alargó - otras 6 horas, después de las cuales se logró una humedad de 9.2 por - ciento según el RADSON y de 3.1/30 = 10.33 por ciento por destilación.

En ese momento se dió por concluída la prueba después de 31 horas de

secado durante las cuales se removió un total de 61.60 por ciento - 9.2 por ciento = 52.46 por ciento de humedad a una temperatura promedio de secado de 39.59 °C, con una humedad relativa promedio del aire de secado de 22.77 por ciento.

A continuación se muestran unas tablas con los datos, los resultados y unas gráficas que comparan los resultados y las desviaciones con las predicciones teóricas.

HORA DE SECADO	HORA DEL DIA	TEMP. BULBO SECO (°C) ENT.	SAL.	TEMP. BULBO HUMEDO ENT.	SAL.	HUMEDAD REL. (%)	HUMEDAD DEL GRANO (%)	LECTURA EN MILIVOLTS (GASTO)
0							61.66	
1	19:00	33	19.5	14.5	18.5	14.0		2.75
	19:35	32	19.5	18	18.5	28.0		
2	20:00	31	19.5	17.5	18.5	28.0		2.70
3	21:00	44	19.5	19	18.5	10.25		4.33
4	22:00	43.5	19.5	19	18.5	10.77	58.33	4.35

Condición del ambiente T_{bs} = 25°C T_{bh} = 12°C ϕ = 23 por ciento hora = 17.45

Temp. Promedio de secado = 37.87 °C Hum. rel. promedio = 17.33 por ciento

Altura inicial = 15 cm.

Condición ambiental T_{bs} = 23.5°C T_{bh} = 17°C ϕ = 50 por ciento

5	14:10	45.5	22	22	21	14.87		4.17
6	15:10	45.5	22	23	21.5	17.12		4.32
7	16:10	46	23.5	22	23	14.27		4.30
8	17:10	45.5	22.5	22	21	14.87		4.19
9	18:10	44	21	20	20	12.41		4.50
10	19:10	42	20	20.5	19	16.19		4.05
11	20:10	42	19.5	20.5	19	16.19		4.18
12	21:10	43	20	21	19.5	15.74		4.63
13	22:10	42.5	19.5	21.5	19	18.0	45.0	4.68

Temp. Promedio de secado = 44 °C Hum. rel. promedio = 15.52 por ciento

HORA DE SECADO	HORA DEL DIA	TEMP. BULBO SECO (°C) ENT.	SAL.	TEMP. BULBO HUMEDO (°C) ENT.	SAL.	HUMEDAD REL. (%)	HUMEDAD DEL (%)
	Condición ambiental a las 10:00 horas:	T_{bs} = 20 °C		ϕ = 60 por ciento			
				T_{bh} = 15 °C			
14	11:15	45	21.5	23	20.5	17.82	
15	12:15	46.5	22	24	21	17.93	
16	13:15	37.5	22	22.5	21	30.3	
17	14:15	38.5	21	21.5	20	24.97	
18	15:15	39	21	22	20	25.49	37.1
19	16:15	39	21	22	20	25.49	31.8
20	17:15	38	21	22.5	19	29.18	30.0
21	18:15	39	22	22	20	25.49	28.6
22	19:15	38.5	22	23	20	30.01	27.3
23	20:15	37.5	22	22	19	28.94	24.5
24	21:15	36	22.5	21	19	29.14	21.7
25	22:15	36.5	23	19.5	19	23.12	19.2

Temp. Promedio de secado = 39.25 °C Hum. rel. promedio = 25.03 por ciento

Altura de la cama en la hora 19: 8.5 cm

en la hora 25: 7.75 cm

Condición ambiental a las 12:30 horas: T_{bs} = 20.5°C; ϕ = 59.27 por ciento

T_{bh} = 15°C

HORA DE SECADO	HORA DEL DIA	TEMP. BULBO SECO (°C) ENT.	TEMP. BULBO SECO (°C) SAL.	TEMP. BULBO HUMEDO (°C) ENT.	TEMP. BULBO HUMEDO (°C) SAL.	HUMEDAD REL. (%)	HUMEDAD DEL GRANO (%)	LECTURA EN MILIVOLTS (GASTO)
26	13:30	33.5	25	22.5	19	41.89	19.2	3.00
27	14:30	39.5	27	23	19.5	27.61	16.0	4.09
28	15:40	39	29	23.5	20.5	30.45	13.1	3.95
29	16:30	37	29.5	22	19.5	30.72	12.2	3.69
30	17:30	37.5	30	23	20	32.37	11.1	3.60
31	18:30	37	30	23.5	19	36.38	9.2	3.30

Altura de la cama 6.6 cm

Temp. Promedio de secado = 37.25 °C Hum. rel. promedio = 33.23 por ciento

TOTAL DE HUMEDAD REMOVIDA = 61.66 - 9.2 = 52.46 por ciento

*TEMP. PROMEDIO DE SECADO = 39.59 °C

*HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO DEL AIRE DE SECADO = 22.77 por ciento

GASTO DE AIRE PROMEDIO = 56.39 kg/hr

*NOTA.- los valores reales debidos al abatimiento de temperatura se encuentran en la tabla A4.1

De los resultados obtenidos se puede hacer un análisis que dé una aproximación en forma gruesa de la precisión con que se llevaron a cabo las lecturas. Para ello, se determina el gasto que debe utilizarse con el objeto de que el agua perdida por el grano durante todo el proceso, sea el agua que el aire debe remover en su paso por la cama. Estos cálculos se hacen tomando los promedios de las temperaturas y humedades relativas de entrada y salida del aire.

Humedad relativa promedio de entrada = 38.27 por ciento (b.h.)

Temperatura real promedio de entrada = 30.14 °C

De la carta psicrométrica se obtiene la humedad específica para las condiciones de entrada:

$$W_1 = 0.0138 \text{ Kg agua/Kg aire}$$

Humedad relativa promedio de salida = 81.7 por ciento (b.h.)

Temperatura real promedio de salida = 21.56 °C

De la carta: $W_2 = 0.0165$ kg agua/Kg aire

$$\Delta W = W_2 - W_1 = 2.6 \times 10^{-3} \text{ kg agua/kg aire}$$

La cantidad de maíz utilizada fue 6.92 kg con una humedad del 61.66 por ciento, base húmeda lo que implica que la masa seca M es:

$M = M_t(1-X_o)$ donde M_t = masa total
X_o = humedad inicial

$M = 6.92\ (1-0.6166)$

$M = 2.65$ kg

$$\text{Cantidad de agua perdida por el grano} = M_t - M$$

$$\text{Agua perdida} = 6.92 - 2.65 = 4.27 \text{ kg agua.}$$

Con ello el gasto que equilibre la cantidad de agua ganada por el aire y la perdida por el grano, debe ser:

$$\text{Agua perdida} = \text{Gasto} \times \Delta M \times \text{tiempo de secado}$$

$$\text{Gasto} = \frac{\text{Agua perdida}}{\Delta M \times \text{tiempo de secado}} = \frac{4.27}{2.6 \times 10^{-3} \times 31} = 52.97 \text{ kg/hr.}$$

El gasto real promedio fue de 56.39 kg/hora, lo que muestra que el error en las mediciones fue aproximadamente de 6.05 por ciento.

HORA DE SECADO (hrs.)	TEMP. REAL DE ENTRADA (°C)	HUMEDAD RELATIVA DE ENTRADA (%)	HUMEDAD RELATIVA DE SALIDA (%)	GASTO (kg/hora)
1	23.0	27.00	92.37	63.31
2	21.0	47.00	92.37	61.94
3	34.0	19.00	92.37	54.49
4	33.5	19.85	92.37	54.00
5	36.0	26.20	93.20	55.01
6	36.0	28.50	94.50	54.49
7	36.5	26.10	95.10	54.51
8	36.0	26.20	91.20	55.026
9	34.0	22.30	94.30	54.058
10	32.0	28.10	93.10	55.46
11	32.0	28.10	97.00	55.00
12	33.0	26.40	96.50	53.38
13	32.5	32.00	97.00	53.26
14	35.0	28.10	90.30	53.39
15	36.5	28.50	91.10	53.39
16	27.5	51.00	91.10	58.22
17	28.5	43.20	90.20	58.48
18	29.0	41.50	90.20	57.00
19	29.0	41.20	90.20	57.72
20	28.0	46.20	86.30	56.98
21	29.0	41.20	85.50	56.40
22	28.5	51.00	85.50	56.56
23	27.5	49.50	77.20	56.92
24	26.0	48.30	74.30	57.48
25	26.5	39.50	69.50	57.31
26	24.0	60.00	60.20	61.11
27	29.5	48.00	57.60	55.04
28	33.0	40.00	49.60	55.59
29	31.5	41.00	43.50	56.92
30	31.6	44.00	42.70	57.48
31	31.5	46.00	38.10	59.03
Promedio	30.14	38.27	81.7	56.39

La temperatura de bulbo seco de salida promedio es 21.56 °C

TABLA A4.1 Características del aire durante la prueba.

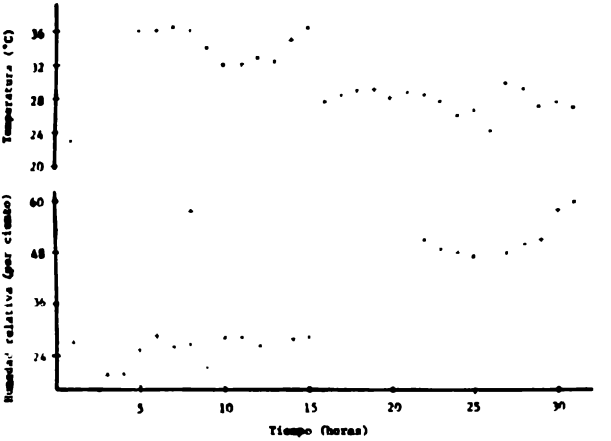


Fig A.4.1 Características psicrométricas del aire en el plenum durante la segunda prueba.

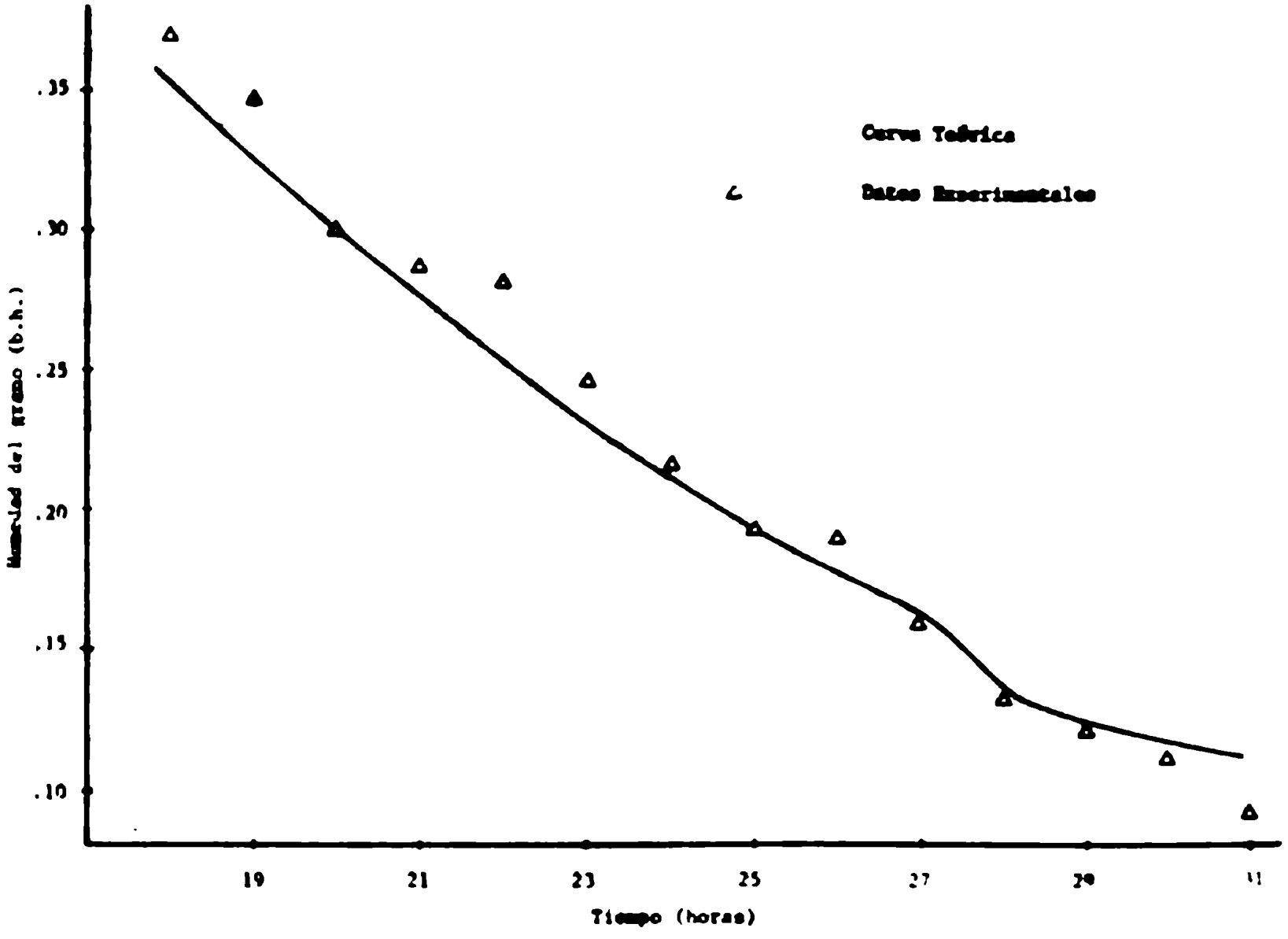


Fig A.4.2 Correlación teórico-experimental de la 2a. prueba, para una masa seca de maíz de 2.65 kg. El cambio brusco de la curva teórica en la hora 27 se debe a un incremento en 20 por ciento de la humedad relativa del aire en el plenum.

APENDICE 5. PRECISION DE LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES

Se realizaron mediciones de temperatura, humedad del grano, gasto de aire y altura de la cama.

Por lo que respecta a las lecturas de humedad del grano, se puede dar una aproximación de la exactitud con base en los datos tomados con el Radson y el método de destilación. Se tomaron cuatro lecturas en tiempos iguales y con ambos métodos resultando una desviación promedio de 6 por ciento.

Las temperaturas obtenidas con termómetro de mercurio, tienen una precisión de $\pm$ 0.5° C aproximadamente.

La altura de la cama determinada con flexómetro tiene inexactitudes de hasta 0.5 cm.

Referente al gasto se hizo una comparación entre el gasto determinado a partir de la ecuación característica de calibración y el gasto necesario para remover la cantidad de agua del grano, resultando una diferencia del 2.43 por ciento. Esta cifra da una idea de la precisión de medición.