

MODELADO MATEMATICO DE SISTEMAS SECADORES
SOLARES ESTACIONARIOS DE MAIZ EMPLEANDO
COLECTORES CILINDRICOS DE POLITILENO

APROBADO POR EL JURADO:

Presidente: DR. JOSE LUIS FERNANDEZ ZAYAS
Vocal: M EN I ALEJANDRO RODRIGUEZ VALDES
Secretario: DR. MANUEL MARTINEZ FERNANDEZ
Suplente: DR. ANTONIO ALONSO CONCHEIRO
Suplente: DR. ISAAC PILATOWSKY FIGUEROA



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

500,989

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

MODELADO MATEMATICO DE SISTEMAS
SECADORES SOLARES ESTACIONARIOS DE MAIZ
EMPLEANDO COLECTORES
CILINDRICOS DE POLIETILENO

TESINA

que presenta

JAVIER A. ALFARO CASTILLO

A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE

POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER

EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA

(E N E R G E T I C A)

CIUDAD UNIVERSITARIA

1 9 8 8

A mis padres y hermanos

INDICE

RESUMEN	I
AGRADECIMIENTOS	II
NOMENCLATURA	III
1. INTRODUCCION	
1.1 Justificación del estudio	1
1.2 Antecedentes	3
1.2.1 Modelos de simulación de secado	8
2. MODELOS MATEMATICOS	
2.1 Modelo matemático del calentador solar de aire	12
2.1.1 Bases teóricas	12
2.1.2 Modelos de pérdidas térmicas	13
2.1.3 Procedimiento de solución	14
2.1.4 Resultados típicos	15
2.1.5 Simplificación del modelo	16
2.1.6 Procedimiento de cálculo de la variación de la temperatura del aire a lo largo del colector tubular	18
2.2 Modelo matemático del secado en el lecho de granos	
2.2.1 Modelo de equilibrio	21
2.2.2 Características psicrométricas	24
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS	
3.1 Descripción del equipo y aparatos empleados	28
3.2 Descripción de los experimentos de secado	29
3.3 Discusión de los resultados de secado	31
3.4 Descripción de la evaluación experimental del colector cilíndrico de plástico	36
3.5 Discusión de los resultados de la evaluación del colector	37

4.	CORRELACION TEORICO-EXPERIMENTAL	
4.1	Determinación del coeficiente de difusividad aparente del maíz	39
4.2	Comparación de los resultados teóricos y experimentales del secado en el lecho de granos	41
4.3	Correlación teórico-experimental del colector cilíndrico.	42
5.	APLICACION DEL PROGRAMA DE SIMULACION DE SECADO SOLAR DE MAIZ EN SILOS ESTACIONARIOS	43
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	Conclusiones	46
6.2	Recomendaciones	47
	FIGURAS	49
	REFERENCIAS	88
	APENDICE	90

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo son: mejorar el modelo matemático de secado en el lecho de granos desarrollado por Palacio A. y Rodríguez A., desarrollar el modelo matemático de simulación de un colector solar tubular de polietileno (caracterizado por Gutiérrez F. y Tovar R.), unir los dos programas anteriores para dar origen al modelo matemático de sistemas secadores solares estacionarios de maíz y obtener resultados de simulación para pronosticar el secado solar de granos en algunos estados de la República Mexicana, aportando datos para el diseño aproximado y rápido de sistemas secadores solares estacionarios.

El presente trabajo muestra la correlación teórico-experimental del colector cilíndrico, la cual es bastante aceptable, tiene un error promedio de 1.05%. Para determinar el valor del "coeficiente de difusividad aparente", que es el parámetro de calibración del modelo numérico, se realizaron cuatro pruebas con un modelo experimental de secado solar. Los datos de las condiciones del aire y de los granos sirvieron de entrada al modelo numérico de simulación del secado en el lecho de granos, con el fin de mejorar el pronóstico del secado con base en la "difusividad aparente". El error promedio total de la correlación es de $\pm 14\%$ con respecto a la humedad medida en base seca, lo que significa que el modelo matemático mejorado es útil para pronosticar el secado solar de maíz en silos estacionarios. El análisis de los resultados nos muestra que: la temperatura, la humedad específica y el gasto del aire a la entrada del silo; la humedad y temperatura del grano, son las variables que tienen más influencia en la velocidad del secado; debido a la capacidad calorífica del maíz, cuando los estratos inferiores se han sobre secado funcionan como un almacén térmico, calentando y secando al aire, favoreciendo el secado de los estratos superiores durante las noches o durante períodos cortos de nubosidad. La selección del aumento del flujo o aumento de la temperatura del aire se debe hacer en función del potencial de secado del lugar donde se encuentre instalado el silo.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al Dr. José Luis Fernández Z. por: haber sido uno de mis mejores profesores, dirigir el presente trabajo, brindarme su apoyo incondicional, y asignarme al M. en I. Alejandro Rodríguez V. como asesor técnico.

Agradezco igualmente al M. en I. Alejandro Rodríguez V. el haberme asesorado en la parte técnica y experimental, por sus valiosas sugerencias en la redacción y presentación de éste trabajo y por su actitud siempre comprensiva.

Un agradecimiento especial al Ing. José Alberto Rodríguez M. por: conseguir el material y los aparatos de medición utilizados; haber iniciado los experimentos de secado; permitir que formáramos un buen equipo para la realización de los experimentos, obtención de los resultados experimentales y el procesamiento de los resultados; y haberme facilitado gran parte de las referencias bibliográficas.

Adicionalmente agradezco al Ing. Salvador Villegas L., a Teresa G. Ruiz y a Rosa I. Chávez P. su estusiasta colaboración en la realización del escrito

Finalmente expreso mi más profundo agradecimiento al pueblo de México quien ha financiado mi formación profesional.

NOMENCLATURA

Variable	Definición	Unidades
A	Área	m ²
b. h.	Bulbo húmedo, base húmeda	
b. s.	Bulbo seco, base seca	
C, C _p	Calor específico	kJ/kg K
D	Difusividad, diámetro	m ² /hr, m
d	Derivada	
E	Coefficiente de pérdidas de calor	kW/m ² °C
F	Factor	
F'	Factor de eficiencia del colector	
F''	Factor de flujo del colector	
G	Irradiancia, gasto másico de aire	kW/m ² , kg hr ⁻¹ m ⁻²
$Gr = \frac{gD^3 \beta \rho^2 \Delta T}{\mu^2}$	No. de Grashof	
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
h	Coefficiente de transferencia de calor, entalpía	kW/m ² C, kJ/kg
h'fg	Calor de desorción	kJ/kg
k	Conductividad térmica	kW/m ² C
L	Longitud, longitud del día solar	m, hr
M	Masa del colector, humedad	kg
MR	Razón de humedad	
m	Flujo másico de aire	kg/s
$Nu = \frac{h D}{k}$	No. de Nusselt	
n	No. del día del año, No. de estratos	
P	Presión, presión parcial	kpa
$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$	No. de Prandtl	
Q	Flujo de calor	kW/m ²
q	Flujo de calor, gasto volumétrico específico	kW/m ² , m ³ /min m ²
R	Resistencia, factor geométrico, constante del aire	m ² C/kW, J/kg K
$Ra = Gr Pr$	No. de Rayleigh	

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu}$$

	No. de Reynolds	
r	Coordenada radial, radio del colector	m
T	Temperatura	C, K
\bar{T}	Temperatura promedio	C, K
t	Tiempo, toneladas	hr
U	Coefficiente global de pérdidas de calor	kW/m ² C
V	Velocidad del viento, volumen	m/s, m ³
W	Humedad específica	kg vapor/kg aire seco
X	Humedad del grano (b.s.)	%
x	Longitud	m
y	Coordenada en el espacio de la cama de granos	m
α	Absortancia, área de colector/área de cama de granos	
β	Angulo de inclinación del colector, gasto nocturno/gasto diurno	Grados
β	Coefficiente de expansión volumétrica	°C ⁻¹
γ	Angulo azimutal de la superficie del colector	Grados
Δ	Incremento	
δ	Declinación solar	Grados
∂	Derivada parcial	
ϵ	Emitancia	
η	Eficiencia	%
θ	Angulo de incidencia	Grados
μ	Viscosidad dinámica del aire	N/m ²
ρ	Densidad del aire, reflectancia	kg/m ³
σ	Constante de Stefan Boltzman	kW/m ² K ⁴
ϕ	Latitud, humedad relativa	Grados, %
ω	Angulo horario	Grados

Superíndice

- * Aparente
- Referido a la temperatura del bulbo húmedo, a base húmeda

Subíndice

a	Aire, ambiente, referido a la absorción
b	Barométrica
c;ca	Colector, convección; captación
ci	Cielo
c, p-c	Convección entre la placa y la cubierta
d	Difusa, día solar
e; es	Exterior, entrada, equilibrio; entrada al silo
ec	Entrada al colector
f	Final, fluido
fg	Vaporización
g	Grano, gas
h	Hidráulico
i, i	Interior, inicial
máx.	Máxima
mín.	Mínima
p	Placa, pérdida
R	Referido a la remoción de calor
r	Radiación, radiado
ri	Radiación infrarroja
r, p-ci	Radiación entre la placa y el cielo
s, sc,ss	Saturación, salida del colector, salida del silo
T	Sobre una superficie inclinada, total
t	Tiempo
u	Util
v, vs	Vapor, vapor saturado
z	Cenit
z	Total de pérdidas de calor del colector
o	Inicial

INTRODUCCION

1.1. Justificación del estudio.

Entre los grandes problemas que tenemos en México, destaca la insuficiencia de nuestros principales insumos alimenticios tales como maíz, frijol, etc. Una de las causas principales es la gran pérdida anual que tenemos de dichos insumos. En 1974 se realizó una encuesta¹ y se encontró que las pérdidas por prácticas deficientes de almacenamiento fueron del 30% para el sector rural, las cuales representaron una pérdida de poco más de un millón de toneladas de maíz con un costo de más de \$ 1,600 millones (pesos M.N. de 1979). En 1983 las pérdidas de maíz, comprendidas desde su cosecha a su comercialización, fueron del orden del 10%, es decir 1'306,120.8 toneladas con un costo de \$ 264'515,599 (pesos M.N. de 1987)^{1,2}. En septiembre de 1987, el subsecretario de Comercio Interior de la Secofi, Jesus Sanchez Jimenez, dijo que en México cada año se

pierde alrededor del 10 % del volumen de granos y oleoginosas por almacenamiento deficiente. Asimismo, añadió, "por la degradación de la calidad alimenticia de los granos por malas condiciones de almacenaje, se estima que la población de latinoamérica ingiere hasta 30 % menos del contenido original de proteínas de semillas como el maíz, trigo, frijol y arroz"²

El problema anteriormente mencionado exige la necesidad de investigar y lograr un desarrollo tecnológico en materia de secado de cereales. La energía solar puede constituir una solución adecuada al problema ya que en nuestro país el maíz se cosecha con un contenido de humedad de entre 20 y 25 %³ base húmeda, tenemos buena insolación durante la mayor parte del año, pues cada m² de superficie recibe un promedio de 2000 kWh/año⁴ y se puede comprobar que se pueden obtener buenos resultados en el uso y manejo adecuado de colectores de plástico^{5,6,7y8}.

Por otra parte, el secado solar proporciona la oportunidad de:

- a) Diversificar fuentes de energía, reduciendo la dependencia de las fuentes de energía primaria (petróleo y gas natural).
- b) Ahorrar, por ejemplo, 4,070 kJ/kg de agua removida, que es la energía requerida al emplearse un secador de granos de flujo a contracorriente, de dos etapas, cuando la humedad inicial del grano es, en promedio, de 25 % base húmeda y la temperatura del aire de secado es de 250 C.⁹
- c) Cosechar tan pronto como el maíz haya llegado a su madurez fisiológica (36 a 40 % de humedad b.h.³) lo cual reduce las pérdidas de los productos originadas por el exceso de lluvias y destrucción natural, evitando que la tierra esté ociosa. Además, las condiciones de la tierra para la siguiente siembra son mejores (en zonas de riego).

- e) Evitar la gran pérdida de cereales que se tiene durante el almacenamiento.

Al evitar las pérdidas, obtendríamos los siguientes beneficios;

- a) Los agricultores podrían vender mayor cantidad de granos
- b) Habría mayor abundancia de cereales para satisfacer la demanda del país.
- c) Mejoraríamos nuestra economía y nuestra independencia, ya que los alimentos tienen un carácter estratégico para evitar la injerencia extranjera en los asuntos internos de nuestro país.

Con base en lo anteriormente señalado, se realizó la tesina presente, titulada "Modelado Matemático de Sistemas Secadores Solares Estacionarios de Maíz empleando colectores cilíndricos de polietileno. En el capítulo dos se presenta el modelo matemático analítico del colector cilíndrico de polietileno y transferencia de calor y masa para la cama de granos. En el capítulo tres se presentan los resultados experimentales del secado de maíz empleando un colector solar plano de bajo costo y los resultados experimentales del análisis térmico de un colector cilíndrico de plástico. En el capítulo cuatro se presenta la correlación de los resultados teóricos y experimentales para validar el modelo desarrollado y determinar los parámetros empíricos correspondientes, en el capítulo cinco se presenta la aplicación del programa de simulación de secado solar de maíz en silos estacionarios. Finalmente, en el capítulo seis se presentan las conclusiones y recomendaciones.

1.2 Antecedentes

El secado de cereales data desde el inicio de la civilización. El secado natural de la mazorca primero ocurrió en el tallo, después en la vaina formando montones pero las semillas germinaban pasados algunos días (7 a 14 días). Los cereales para el consumo humano ocasionalmente fueron secados en hornos

rústicos o en cuartos calientes, pero el uso de la energía solar y el movimiento del aire proporcionaron el mejor método de remoción de la humedad de los granos en el campo⁹.

Entre la I y la II Guerras Mundiales, varias unidades mecánicas experimentales para el secado de cereales fueron construidas y unas cuantas unidades comerciales entraron en operación. Los secadores comerciales primeramente fueron construidos para deshidratación de frutas, vegetales, heno y maíz¹⁰

El uso de secadores comerciales y domésticos a gran escala fue una práctica común después de la II Guerra Mundial. El incremento en la necesidad de secar granos estuvo ligado a la mecanización en el campo lo que aumentó la productividad de la tierra y del trabajo.

La rapidez de las operaciones de cosecha propició el uso de aire caliente para secar los granos en forma continua, predominando el secado rápido por estratos, generalmente con temperaturas menores a 80°C.¹⁰

Posteriormente llegó a ser más importante el uso de sistemas secadores con aire caliente forzado. Se diseñaron silos y depósitos para el secado y almacenamiento de los cereales.

En 1968 la cantidad de productos agrícolas deshidratados mediante energía solar alcanzaron 255×10^6 t. aproximadamente. Durante ese año, Australia exportó más de 42×10^3 t. de alimentos secados al sol, con valor de 27 millones de dólares. Durante los últimos tres decenios, ha aumentado el interés por el desarrollo de secadores solares que utilizan los principios conocidos de la heliotecnología¹¹.

Recientemente se han realizado trabajos sobre el secado solar, en varios países del mundo (tanto experimentales como de simulación), la mayoría de los cuales se han llevado a cabo en Estados Unidos porque en ese país la humedad de los granos, durante la cosecha, es baja (20 a 28% b.h.), porque en los otros países industrializados se tiene poca demanda de grandes

plantas deshidratadoras de granos¹² y, porque en los países subdesarrollados o hay escasez de granos o no se apoya la investigación en el ramo.

Una revisión de los trabajos realizados en el secado solar de granos revela que se han usado plásticos tubulares con y sin cubierta transparente, así como también colectores inflables de plástico⁵ dando buenos resultados. En los colectores tubulares probados por Foster y Peart⁵, casi la mitad del incremento de temperatura del aire ocurrió en los primeros 12.2 m de un colector de 30.5 m de longitud, y pequeños incrementos de temperatura ocurrieron en los últimos 6.1 m del colector. Estos autores comprobaron que los colectores tubulares, apovados en el suelo, sin aislante térmico, proporcionaron, en promedio, 25% más energía (en otoño) que un colector similar aislado térmicamente. Empleando una cubierta transparente se incrementó en 50% la cantidad de energía colectada por un colector de 0.91 m de diámetro y 30.5 m de longitud.

En el Grain Marketing Research Center de los Estados Unidos de Norteamérica se usó un colector tubular con un área de 28 m², aproximadamente, para secar maíz con un contenido inicial de humedad de 23% base húmeda. Después de 20 días de secado en un flujo de aire de 2.7 m³/min.t. la humedad del grano descendió a 13.2% base húmeda. Simultáneamente se empleó aire a la temperatura del ambiente para secar otra cantidad igual de maíz con un flujo de aire de 3 m³/min t y después de 20 días de secado el contenido de humedad del grano bajó a 14.4% base húmeda (b.h.)⁵. Por lo tanto la energía solar disminuye el requiriendo de aire y el tiempo de secado (dependiendo de la temperatura y humedad específica del aire, temperatura y humedad del grano).

También se han hecho pruebas en 12 estados del centro de la región norte de los Estados Unidos para obtener el flujo mínimo de aire que se requiere para secar maíz cuando se tiene un incremento de temperatura de 2.8 C aproximadamente (sobre la

temperatura ambiente). El flujo mínimo promedio de aire requerido fue de $2.12 \text{ m}^3/\text{min t}^{13}$.

A Harnoy y W. Radajewski¹⁴, durante una prueba de secado, con aire a la temperatura del ambiente, introdujeron periodos intermitentes de operación del motoventilador para comprobar que se mejora la eficiencia térmica de un sistema de secado, permitiendo que una mayor cantidad de maíz por unidad de tiempo se seque empleando la misma cantidad de energía eléctrica que en el secado continuo. La eficiencia máxima se alcanzó cuando la razón de soplado* fue de 8 aproximadamente.

T. C. Bridges, O.J. Loewer Jr., J.N. Walker y D.G. Overhult¹⁶ proporcionan una descripción de la capacidad del programa de simulación CHASE (Chase Handling And Storage Evaluator) y explican como lo usan los ingenieros de diseño e investigación. El programa CHASE realiza las siguientes funciones.

1. Examina y diseña sistemas de cosecha, transporte, secado y almacenamiento.
2. Clasifica los costos de los sistemas considerados
3. Presenta el equipo y trabajo requerido para cada sistema factible .

M. Akyurt y M.K. Selçuk¹⁷ pusieron a punto un secador prototipo para frutas y legumbres. Consiste en un captador de placa plana recubierto de vidrio y conteniendo viruta de metal, un secador con paredes translúcidas y un túnel aislado que une ambos elementos. Encontraron que en esencia la unidad es funcional. Los resultados experimentales sugieren que aún bajo condiciones climáticas desfavorables durante el otoño, el secador es capaz de producir productos secos de buena calidad.

R. O. Pierce, T.L. Thompson¹³ hicieron un estudio de simulación

* razón de soplado = $(\text{tiempo de ventilación} + \text{tiempo sin ventilación})/\text{tiempo de ventilación}$

para las áreas productoras de maíz más importantes de los Estados Unidos. El estudio reveló dos problemas principales asociados con la operación de sistemas de secado con baja temperatura:

- a) Altas tasas de flujo de aire requeridas para maíz cosechado con alto contenido de humedad.
- b) El sobresecado excesivo que ocurre con la adición de calor. (Estos problemas son de tal magnitud que se requiere un estudio adicional).

Concluyen que el flujo de aire es el factor más importante en el diseño de sistemas de secado con aire natural.

Frederick H. Buelow¹⁸ probó que cuando el maíz se seca con aire forzado, la humedad relativa debe ser menor que 62% en la mayoría de los casos para disminuir suficientemente el contenido de humedad del grano para que pueda ser almacenado sin riesgo de descomponerse.

K. Vance Morey, Harold Cloud, Robert J. Gustafson y Daniel W. Peterson¹⁹ usaron un modelo para simular el funcionamiento de sistemas de secado a bajas temperaturas para diferentes contenidos de humedad inicial, encontrando que el calor solar adicional generalmente reduce la tasa de flujo de aire mínimo requerido en un 10 a 15% en comparación con el secado con aire ambiente. También se reducen las horas de operación del motoventilador y la energía requerida para el secado, pero se incrementa el sobresecado del grano en el fondo del silo antes de que el frente de secado alcance la cima del lecho de granos. Palacio A. y Rodríguez A.²⁰ formularon un modelo matemático representativo del secado de maíz en el que se incluye el concepto de "difusividad aparente" que permite tener una mayor precisión en la predicción del proceso. Con base en los resultados obtenidos de la correlación teórica-experimental, el modelo matemático desarrollado predice adecuadamente el proceso de secado para una cama de maíz rehumedecido y mutilado.

1.2.1 Modelos de simulación de secado^{21,22}

Los primeros esfuerzos para simular el proceso de secado de granos fueron realizados por Hukill. Posteriormente se desarrollaron numerosos modelos de simulación del secado de granos. Los modelos se clasifican en:

- 1) modelos de secado por estratos
- 2) modelos de secado de lecho profundo.

En general, dependiendo de la naturaleza del desarrollo de las ecuaciones matemáticas, los modelos de simulación pueden agruparse en:

1. Modelos de difusión
2. Modelos de ecuaciones diferenciales parciales
3. Modelos simultáneos de transferencia de calor y masa
4. Modelos logarítmicos
5. Modelos de equilibrio
6. Modelos semiteóricos
7. Modelos empíricos

Breve discusión de algunos modelos comunmente usados

a) Modelos de secado por estratos

Luikov describió la transferencia de humedad en materiales capilares porosos, tales como cereales, por medio de mecanismos físicos de difusión (líquidos, vapor y calor), flujo capilar y flujo hidrodinámico. Esta teoría dió por resultado un sistema de ecuaciones diferenciales parciales. Algunos investigadores usaron los modelos de ecuaciones diferenciales parciales. Estos modelos no fueron muy populares por su complejidad y requerimiento de mucho tiempo de procesamiento en computadora.

Lewis consideró que el secado era directamente proporcional a la diferencia entre el contenido de humedad del material que se estaba secando y su contenido de humedad de equilibrio con el aire que lo

rodeaba, es decir

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e)$$

donde:

M = Contenido de humedad base seca (decimal)

t = Tiempo de secado (hr)

k = Constante de secado (hr^{-1})

M_e = Humedad de equilibrio base seca (decimal)

El modelo considera que toda la resistencia al flujo de humedad está concentrada en la superficie del material. Integrando la ecuación anterior tendremos:

$$MR = \frac{(M_f - M_e)}{(M_i - M_e)} = \exp(-kt)$$

donde:

MR = Razón de humedad (adimensional)

M_i = Constante de humedad inicial, base seca
(decimal)

M_f = Humedad final, base seca (decimal)

Esta ecuación es conocida como ecuación de secado. También se le conoce como ecuación del modelo exponencial o logarítmico.

b) Modelos de secado en lecho profundo

Para modelar un lecho profundo de granos, este se considera como una serie de capas delgadas colocadas una sobre otra. Las condiciones de salida del aire de una capa son usadas como condiciones de entrada para la capa superior. Para resolver las ecuaciones del balance de calor, masa y energía se usan las relaciones termodinámicas entre el aire de secado y la humedad del grano.

Para bajas temperaturas y poco flujo de aire, Bloome y

Shave consideraron equilibrio entre el aire de secado y el grano en cada capa, durante un cierto periodo. Posteriormente, Thompson mejoró el modelo de equilibrio propuesto por Bloome y Shove. Las modificaciones posteriores de los modelos de equilibrio fueron propuestas por Morey et al. y Mittal and Ottend para obtener mejores resultados.

Generalmente los modelos de Bloome y Shove, y Thompson dan resultados razonables bajo condiciones donde las consideraciones de equilibrio son válidas.

El mejoramiento de los modelos de simulación aplicables al secado de granos han sido buenos. Se hacen continuos esfuerzos para mejorar los modelos existentes incorporando nuevos parámetros para incluir los efectos del contenido de humedad del grano, la temperatura del aire, flujo másico de aire y humedad relativa del aire. Se están haciendo esfuerzos en el modelado para lograr la optimización del secado de granos y de la selección del silo, basándose en la estrategia del cosechado y en las restricciones económicas.

Los modelos de equilibrio se han comparado más ampliamente con experimentos de secado con baja temperatura que los modelos que utilizan ecuaciones diferenciales parciales o modelos logarítmicos. La mayoría de los modelos están orientados al trabajo de investigación más, que al diseño; por tal motivo existe una carencia de herramientas sencillas para el diseño preliminar de sistemas secadores solares de granos.

En el Instituto de Ingeniería, UNAM, se han realizado trabajos de secado solar de granos de entre los cuales destaca un modelo matemático realizado por Palacio A. y Rodríguez A.²⁰ Al hacer una revisión de este modelo y del maíz empleado en el experimento, se encontraron incongruencias entre las suposiciones adoptadas, ya que el maíz empleado fue rehumedecido y se desgranó con un instrumento cortante,

mutilando al maíz. De esta manera se obtiene un coeficiente de "difusividad aparente" que no es representativo del fenómeno de secado de granos sanos, que no han sido rehumedecidos.

2

MODELOS MATEMATICOS

2.1 Modelo matemático del calentador solar de aire

2.1.1 Bases teóricas

En un calentador solar de aire donde el flujo es a lo largo de su eje longitudinal, el aire tiene una temperatura que es función de la posición a lo largo del colector y del tiempo. La variación en el tiempo depende de la variación de la temperatura del aire a la entrada del colector, de la magnitud de la radiación solar absorbida, de la temperatura del ambiente y de la velocidad del viento. Las pérdidas térmicas, sobre todo en régimen turbulento en el interior del absorbedor, serán fundamentalmente en la dirección perpendicular a la dirección del flujo de aire.

En captadores solares cilíndricos de material ligero, como láminas plásticas, se puede despreciar la resistencia térmica

de las paredes del tubo o ducto conductor (cuando el espesor es por ejemplo menor a 0.0002 m) del aire. Así, la transferencia de calor del absorbedor al ambiente se representa en la fig 1 en la que adicionalmente se acepta que el coeficiente de convección es alto y por tanto se justifica la consideración de que la temperatura del fluido en un punto cualquiera es igual a la temperatura del absorbedor en el mismo punto. La construcción del modelo matemático se describirá a continuación. En estado permanente,

$$\frac{dT_p}{dt} = 0, \quad \frac{dT_p(x)}{dx} = \frac{A_c}{dx} \left(G_T \frac{T_p(x) - T_a}{R_T} \right) dx \quad (1)$$

donde $\frac{A_c}{dx}$ es el área de captación por unidad de longitud, $T_p(x)$ es la temperatura del absorbedor variable con la posición longitudinal x , T_a es la temperatura del ambiente y G_T es la radiación solar absorbida por el colector.

Como el área de captación, A_c , no es igual al área de pérdidas térmicas, A_{pc} , entonces:

$$\frac{dT_p(x)}{dx} = \frac{A_c}{dx} (G_T) - \frac{A_{pc}}{dx} \left(\frac{T_p(x) - T_a}{R_T} \right) dx \quad (1')$$

La resistencia térmica equivalente del circuito R_T , que a su vez es función de las temperaturas, impide la solución analítica de las ecuaciones (1) y (1'), por lo que los valores de $T_p(x)$ se obtienen mediante un procedimiento iterativo.

2.1.2 Modelo de pérdidas térmicas

Para un colector tubular como el mostrado en la fig. 1, el coeficiente de transferencia de calor por convección h_c se calcula con la siguiente ecuación (flujo perpendicular al eje longitudinal²³), para una velocidad de viento V y diámetro externo D :

$$h_c = Nu \frac{k}{D} \quad (2)$$

$$Nu = \left[0.35 + 0.56 \left(\frac{VD\rho}{\mu'} \right)^{0.5} \right] Pr^{0.31} \quad (3)$$

Las propiedades físicas de viscosidad μ , conductividad térmica k , y densidad ρ se evalúan a la temperatura promedio de la superficie del colector y del aire,

$$\frac{T_p + T_a}{2} \quad (4)$$

El flujo de calor radiado por el captador al aire es, por unidad de área

$$q_r = \sigma \epsilon_p (T_p^4 - T_a^4) \quad (5)$$

La resistencia a la radiación puede definirse, entonces, por

$$R_r = \left[\sigma \epsilon_p (T_p^2 + T_a^2) (T_p + T_a) \right]^{-1} \quad (6)$$

El coeficiente de pérdidas de calor del colector, U_2 , está dado por:

$$U_2 = \left[\frac{1}{h_{c,p-a} + h_{r,p-ci}} \right]^{-1} \quad (7)$$

2.1.3 Procedimiento de solución

Las propiedades físicas del aire dependen de la temperatura y están dadas por

$$\begin{aligned} \rho &= 270.9575 \bar{T}^{-1.0024} \text{ kg/m}^3 \\ \frac{g \beta \rho^2}{\mu^2} &= 4.083234 \times 10^{18} \bar{T}^{-4.4357} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1} \\ \mu &= 2.4661 \times 10^{-7} \bar{T}^{0.756394} \text{ Pa} \end{aligned} \quad (8)$$

$$k_a = 1.770056 \times 10^{-7} \bar{T}^{0.876236} \text{ kW/mK}$$

$$Pr = 1.24998 \bar{T}^{-0.099624}$$

Dichas propiedades se refieren al aire ambiente a 2,268 m sobre el nivel del mar²⁵

Para resolver el modelo de pérdidas térmicas es necesario conocer: las temperaturas de la placa T_p y del aire T_a ; la velocidad del viento V , la emitancia de la placa ϵ_p y la reflectancia de la placa ρ_p .

En este análisis se considera superficie no selectiva ($\epsilon_p = 0.96$) y velocidades de viento desde 1 hasta 9 m/s. Las temperaturas T_p y T_a se consideran variables externas. El procedimiento de solución se lleva a cabo de la manera siguiente, de acuerdo con el diagrama de flujo de la fig 2.

Para un colector tubular como el mostrado en la fig 1 primero se suponen valores para los datos: T_p , T_a , V y ϵ_p ; se calculan las propiedades físicas del aire con las que se calcula el número de Nusselt; se calculan las resistencias térmicas de convección y de radiación, y con éstas el flujo de calor del captador al ambiente. Se repite el procedimiento para varias temperaturas del colector y se imprimen los resultados.

2.1.4 Resultados típicos

La solución del modelo matemático permite apreciar la importancia de T_p , T_a y V en el comportamiento térmico del colector solar mencionado anteriormente. La fig 3 describe la variación del calor perdido Q_p para cuatro valores de la temperatura ambiente cuando $V = 1$ m/s.

En la fig 4 se observa la variación de Q_p para velocidades variables del viento considerando la temperatura ambiente constante a 18 C. Podemos notar que al aumentar la velocidad

del viento y la temperatura del colector T_p aumenta considerablemente el calor perdido. Se puede ver en la fig 3 que cuando el colector tubular tiene una temperatura T_p de 58°C , la temperatura T_a es de 28°C y la velocidad del viento V de 1 m/s , se tiene un calor perdido Q_p de 0.332 kW/m^2 . Si la temperatura ambiente T_a disminuye a 8°C y T_p y V se mantienen constantes se tiene un Q_p de 0.522 kW/m^2 , o sea que el Q_p aumenta 57.23% .

Por otra parte, cuando en el colector tubular se tiene una temperatura ambiente de 18°C , $V = 1\text{ m/s}$ y $T_p - T_a = 50^\circ\text{C}$, el calor perdido es de 0.551 kW/m^2 .

2.1.5 Simplificación del modelo

El calor perdido Q_p puede expresarse como una función de $(T_p - T_a)$. Si se acepta un pequeño error, del orden de 4% en la estimación de Q_p , puede aproximarse el resultado por una función en potencias del tipo $Q_p = E(T_p - T_a)^J$ en la que las constantes E , J toman un cierto valor independiente de T_p , para cada juego de parámetros de diseño del captador y para valores determinados de T_a y V^{20} .

Se puede encontrar, para cada curva de las figs 3 y 4 un par de valores de E y J de acuerdo con la función de potencias. Estos valores se obtienen ajustando los puntos de las curvas por mínimos cuadrados.

Los valores de E y J obtenidos se presentan en la tabla 1 que también incluye el valor del coeficiente de correlación r^2 , lo cual indica un buen ajuste entre las coordenadas.

tabla 1
Valor de E y J , para $Q_p = E(T_p - T_a)^J$,
de las curvas de las figs 3 y 4

	$T_a^\circ\text{C}$	E	J	r^2
$V = 1\text{ m/s}$ (constante)	8	0.0088	1.0379	0.9996
	18	0.0093	1.0383	0.9996
	28	0.0098	1.0386	0.9996
	38	0.0104	1.0388	0.9996

tabla 1 (continuación)

	V m/s	E	J	r ²
T _a = 18°C (constante)	1	0.0093	1.0383	0.9996
	3	0.0125	1.0280	0.9997
	9	0.0180	1.0197	0.9998

Los valores de E y J se pueden relacionar a su vez como funciones de T_a y de V. Adoptando un procedimiento de ajustes a funciones exponenciales, los resultados de la tabla 1 permiten desarrollar la expresión general

$$Q_p = E(V, T_a) (T_p - T_a)^J(V, T_a) \quad (9)$$

$$E(V, T_a) = 0.0082V^{0.32895} e^{(0.00552T_a)} \quad (10)$$

$$J(V, T_a) = 1.036V^{-0.0075} T_a^{0.00056} \quad (11)$$

Comparando los resultados al resolver las ecuaciones (10) y (11) con los de la tabla 1, se observa una diferencia consistente del orden del 0.06 - 3.7%, por lo que emplear dichas ecuaciones en modelos matemáticos para estudiar captadores solares conserva la precisión que es razonable esperar en este tipo de problemas. Estas aproximaciones son válidas sólo para los rangos de $0 < V \leq 3.4$ y $D = 0.45$ m. Cuando varía el diámetro varía el Q_p, para este caso se tiene la ecuación

$$Q_p = E(T_p - T_a)^J (0.45/D_o)^{0.124} V^{0.55} \quad (12)$$

donde D_o es el diámetro exterior del colector

La cual se obtuvo de la siguiente manera: se corrió el programa de simulación para calcular Q_p con T_a = 18°C, T_p = 66°C y valores de V y D_o variables, obteniéndose los siguientes resultados

Tabla 2

V	D _e	0.45	1	2	3
1		0.5278	0.4591	0.4182	0.4001
2		0.6136	0.5167	0.4589	0.4334
3		0.6795	0.5609	0.4902	0.4589

Se consideró T_a promedio igual a 18°C porque es la temperatura media que prevalece en la época de mayor cosecha (octubre-noviembre) en el país^{2,27,28} y porque Q_p varía poco con respecto a temperaturas cercanas a 18°C según puede verse en la fig 3. Como los valores de E y J se obtuvieron considerando un diámetro constante e igual a 0.45m, Q_p varió inversamente proporcional a D_e elevado a la potencia V, el coeficiente y el exponente de V se obtuvieron por tanteos. La tabla tres muestra los resultados de Q_p empleando la ecuación (12).

Tabla 3

V	D _e	0.45	1	2	3
1		0.5054	0.4578	0.4201	0.3995
2		0.6201	0.5364	0.4730	0.4339
3		0.6987	0.5829	0.4981	0.4543

Al comparar los valores de las tablas 2 y 3 se concluye que la ecuación (12) es aceptable.

2.1.6 Procedimiento de cálculo de la variación de la temperatura del aire a lo largo del colector.

En estado permanente la ecuación que resulta de hacer un balance de energía para el aire que fluye a través de un colector de longitud dx está dada por

$$\left\{ \dot{m} C_{pa} T_{ec} \right\}_x - \left\{ \dot{m} C_{pa} T_{ec} \right\}_{x+dx} + dx q_u = 0 \quad (13)$$

Para calcular la temperatura del aire a la salida del colector se suponen la temperatura media del tubo y la del fluido, con las cuales se calculan:

$$U_3 = \frac{1}{\frac{r_o \ln \frac{r_o}{r_i}}{k_c} + \frac{1}{h_e}} \quad (14)$$

$$h_e = \frac{Q_p}{T_p - T_a}$$

$$Nu = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.33} \quad (\text{ref. 23}) \quad (15)$$

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_3}{h_i}} \quad \text{donde } h_i = Nu \frac{k_a}{D_h} \quad (\text{ref. 24}) \quad (16)$$

F' es el factor de eficiencia del colector
el factor de flujo del colector dado por

$$F'' = \frac{\dot{m} C_{pa}}{A_{pc} U_3 F'} \left[1 - e^{-(A_{pc} U_3 F' / \dot{m} C_{pa})} \right] \quad (17)$$

donde $\frac{\dot{m} C_{pa}}{A_{pc} U_3 F'}$ es la capacitancia del colector
el factor de remoción de calor del colector dado por

$$F_R = F'' F' \quad (\text{ref. 24}) \quad (18)$$

el calor útil dado por

$$q_u = A_{ca} F_R G T_a - A_{pc} U_3 (T_{ec} - T_a) F_R \quad (19)$$

donde $A_{ca} = D_e x$ y $A_{pc} = \pi D_e x$

La temperatura media del tubo dada por

$$\bar{T}_p = T_{ec} + \frac{q_u / A_{ca}}{U_3 F_R} (1 - F_R) \quad (\text{ref. 24}) \quad (20)$$

y la temperatura media del fluido dada por

$$\bar{T}_f = T_{ec} + \frac{q_u / A_{ca}}{U_3 F_R} (1 - F'') \quad (21)$$

se repite el cálculo de las ecuaciones (14) a (21), corriendo el programa de simulación con el promedio de \bar{T}_p supuesta y \bar{T}_p calculada, hasta que \bar{T}_p y \bar{T}_r sean las correctas.

La temperatura del aire a la salida del colector está dada por

$$T_{ec} = T_{ec} + q_u / (\dot{m} C_{pa}) \quad (22)$$

La distribución de la temperatura ambiente T_a a lo largo del día se calcula de la siguiente manera: para la hora del alba a dos horas después del medio día se emplea la ecuación siguiente (obtenida modificando la ecuación propuesta por Fernández J. L.³⁸):

$$T_a = T_a \text{ mín} + A + A \text{sen} \left[3\frac{\pi}{2} + \pi \frac{T - \frac{L_d}{2}}{\frac{L_d}{2} + 3} \right] \quad (23)$$

Para dos horas después del medio día hasta el alba se emplea la ecuación:

$$T_a = T_a \text{ mín} + A + A \text{sen} \left[\frac{\pi}{2} + \pi \frac{T_1 + 2}{22 - \frac{L_d}{2}} \right] \quad (24)$$

En las ecuaciones (23) y (24) el valor de A está dado por:

$$A = \frac{T_a \text{ máx} - T_a \text{ mín}}{2}$$

Cuando el colector está orientado en la dirección este-oeste se emplea la ecuación

$$\cos\theta = (1 - \cos^2\delta \text{sen}^2\omega)^{0.5} \quad (\text{ref. 24}) \quad (25)$$

y cuando está orientado en la dirección norte-sur la ecuación

$$\cos\theta = \left[(\text{sen}\phi \text{sen}\delta \text{cos}\phi \text{cos}\delta \text{cos}\omega)^2 + \cos^2\delta \text{sen}^2\omega \right]^{0.5} \quad (26)$$

La radiación solar se calcula suponiendo que la radiación difusa es isotrópica, por lo tanto se emplea el sistema de ecuaciones siguiente:²⁴

$$\left. \begin{aligned}
 G_r &= G_b R_b + G_d \\
 G_d &= G - G_b \\
 G &= G_{\text{máx}} \cos^{1.2} \left(\frac{180 T_1}{L_d} \right) \\
 G_b &= G_b \text{ máx} \cos^{1.5} \left(\frac{180 T_1}{L_d} \right) \\
 R_b &= \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}
 \end{aligned} \right\} \text{ref. 24} \quad (27)$$

$$\text{ref. 24} \left\{ \begin{aligned}
 \cos \theta_z &= \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi & (28) \\
 L_d &= \frac{2}{15} \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) / 12 \\
 \omega &= 15t, \quad \delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} \frac{284 + n}{365} \right] & (29)
 \end{aligned} \right.$$

donde L_d es la longitud del día solar.

2.2 MODELO MATEMATICO DEL SECADO EN EL LECHO DE GRANOS²⁰

2.2.1. Modelo de equilibrio

Como los granos contienen una cierta cantidad de agua, existe una presión parcial de vapor dentro de los mismos. De igual manera la humedad específica del aire establece la presión parcial de vapor en el aire en torno de los granos. Cuando existe un gradiente de la presión parcial en la superficie de los granos hay una transferencia de masa en forma de vapor de agua y los granos se humidificarán o se secarán. Si la humedad de los granos es tal que el gradiente es nulo entonces se establece un equilibrio y a dicha humedad se le denomina humedad de equilibrio. Para diferentes variedades de granos y semillas se ha determinado experimentalmente la humedad de equilibrio en función de la humedad relativa y temperatura del aire. En la fig 6 se muestran estos datos para los granos de

maíz. Para el intervalo de temperaturas de interés en el secado solar, se presentan en la misma figura dos rectas que definen datos experimentales obtenidos por Ramírez Genel. En la ref. 29, se modificó la pendiente de la recta para $\phi > 85\%$ de manera que fuese la misma que las curvas de Rodríguez-Arias.

$$\text{si } \begin{cases} \phi \leq 0.85 \\ \phi > 0.85 \end{cases} \quad \text{entonces } X_e = \begin{cases} (14.07\phi + 4.1776)/100 \\ (35.0\phi - 13.63)/100 \end{cases} \quad (30)$$

En el secado a bajas temperaturas se puede considerar que existe equilibrio térmico entre los granos y el aire (en forma local). Esta igualdad de temperaturas simplifica considerablemente el modelo matemático de simulación. Para el secado de una pequeña capa delgada de granos se consideran las siguientes simplificaciones: el flujo de aire es uniforme en toda la capa; las características psicométricas del aire permanecen constantes durante un intervalo de tiempo suficientemente pequeño; y no hay pérdidas de calor (secado adiabático).

Adicionalmente, se considera que la humedad que libera la capa de granos se la lleva el aire, de suerte que al pasar por las capas sucesivas se irá incrementando la humedad específica del aire. Como el proceso es adiabático, el aire se humidifica siguiendo una línea de temperatura de bulbo húmedo constante en la carta psicrométrica. En consecuencia la temperatura de bulbo seco disminuye y la humedad relativa se incrementa (fig A1 del apéndice). Para simular entonces el secado de un lecho profundo de granos, se divide en capas horizontales de espesor entre 0.010 y 0.02 m. y se sigue el comportamiento del aire con un modelo de simulación de la carta psicrométrica al pasar por los N estratos durante intervalos de tiempo de una hora³⁰.

En el secado de los granos hasta humedades adecuadas para su almacenamiento seguro, la resistencia a la remoción de humedad es interna, es decir, la difusión del agua en los granos hacia la superficie de los mismos controla la velocidad de secado.

Por lo tanto la humedad de los granos tiende hacia la humedad de equilibrio exponencialmente en el tiempo. Lo anterior se representa matemáticamente al resolver la ecuación de difusión:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D \frac{\partial^2 x}{\partial r^2} \quad (31)$$

Considerando la geometría de los granos como una placa plana y con condiciones de frontera tales que la humedad en la superficie es la humedad de equilibrio y que la humedad inicial es uniforme, la solución de la ec(31) es³¹.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left\{ - \frac{(2n+1)^2}{4r_0^2} Dt \right\} \quad (32)$$

donde MR es la razón de humedad definida por:

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (33)$$

r_0 es la distancia del centro de la placa a la superficie, que para el maíz se considera un valor constante de 1.53 mm. A partir de un procedimiento experimental, A. Palacio y A. Rodríguez²⁰ calibraron este modelo numérico definiendo una difusividad aparente que engloba las imprecisiones del modelo analítico. Para humedades de los granos de maíz, entre 10 y 30% (b.h.) la difusividad aparente obtenida de la correlación teórico experimental del trabajo citado resultó ser:

$$D^* \times 10^{-8} = -63.1 X' + 21.9 \quad (m^2/hr) \quad (34)$$

Considerando intervalos de tiempo de una hora, $\Delta t = 1$ hr, la ec. (33) se discretizó en el tiempo como:

$$MR = \frac{X(t + \Delta t) - X_e}{X(t) - X_e} \quad (35)$$

donde $X_e(\phi)$ es constante durante Δt . Se tiene entonces una expresión para determinar la variación de humedad de los estratos de granos.

2.2.2 Características Psicrométricas

Para determinar la humedad relativa del aire y calcular su variación al pasar por un lecho de granos se implantó un modelo numérico de simulación de la carta psicrométrica³² (las ecuaciones se muestran en el apéndice). Integrando la ecuación de Clausius-Clapeyron (ecuación A1 del apéndice) para el equilibrio entre fases, se determina la presión de saturación (kPa) en función de la temperatura (K).

$$\ln(p_s/100) = C_1 + C_2/T + C_3 \ln T \quad (36)$$

donde las constantes son $C_1 = 48.9308$, $C_2 = -6833.959$,
 $C_3 = - 5.16923$.

Sobre la carta psicrométrica, las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante se determinan considerando que el cambio de calor latente es igual al cambio de calor sensible.

$$(C_a + C_v w) (T - T') = h'fg (w' - w) \quad (37)$$

Considerando la definición de la humedad específica,

$$w = \frac{R_a}{R_v} \frac{P_v}{P_b - P_v} = 0.622 \frac{P_v}{P_b - P_v} \quad (38)$$

para una presión barométrica dada $w = w (P_v)$.

Para la humedad específica w' correspondiente a la temperatura de bulbo húmedo, la presión parcial es la de vapor saturado a esa temperatura.

Reemplazando en la ec. (37) y aproximando el término

$$\frac{C_v}{C_a} \frac{R_v}{R_a} = 1.151 \cong 1 \quad (39)$$

se obtiene la siguiente expresión

$$P_s - P_v = K(T - T') \quad (40)$$

donde

$$K = \frac{C_a(P_b - P_s)}{0.622hfg}$$

Con estas ecuaciones se determina la temperatura de bulbo húmedo, la humedad específica correspondiente y consecuentemente se calcula el descenso de temperatura y el incremento de la humedad relativa al pasar el aire por cada estrato.

El procedimiento de cálculo es como sigue: siendo la presión barométrica un dato de la localidad, se inicia el cálculo con la temperatura y humedad relativa a la entrada del lecho de granos (T_{es} , ϕ_{es}) con la ec.(36) y la definición de $\phi = P_v/P_s$ se determina la presión parcial de vapor correspondiente.

$$P_v = 100 \phi \exp (C_1 + C_2/T + C_3 \ln T) \quad (41)$$

Se estima un valor de la presión de saturación a la temperatura de bulbo húmedo y del valor de K:

$$P_{si} \cong 1.5 P_v, \quad K = 6.526 \times 10^{-2}$$

Con la ec. (40) se calcula un valor de la temperatura de bulbo húmedo,

$$T' = T - (P_s - P_v)/K \quad (42)$$

Se calculan la ec(41) en forma de función implícita y su derivada con respecto a P_s :

$$f = C_1 + C_2/T' - \ln (T'^{C_3} P_s / 100)$$

$$f' = C_1/(K T') + C_3/(K T') - 1/P_s$$

Por el método de Newton-Raphson se calcula un nuevo valor de la presión de saturación,

$$P_{s_{i+1}} = P_{s_i} - f/f'$$

Se calcula un valor corregido de la pendiente K de la ec. (42) con el nuevo valor de P_s y del calor latente a T_b

$$hf_g = 2,501.4 - 2.38 (T' - 273) \quad (43)$$

Se repiten los cálculos hasta que el error relativo entre los valores consecutivos de P_s es menor a 3×10^{-5} .

La humedad específica del aire w junto con la temperatura definen la capacidad del aire de absorber la humedad contenida en los granos. Al haber condensación durante la madrugada y evaporación de la humedad en las plantas y el suelo durante el día, la magnitud de este parámetro varía durante el día y la noche. Sin embargo, de la revisión bibliográfica realizada por Estrada C.³³ se admite que el promedio mensual de w es aproximadamente constante. Con los valores de temperatura y humedad relativa promedio mensual se estima el valor de w con las ec. (36) y (38) considerando entonces P_v constante la humedad relativa varía de acuerdo a la ec.

$$\phi = P_v/P_s (T) \quad (44)$$

PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de calibrar el modelo numérico de simulación, el presente autor colaboró con el Ing. José A. Rodríguez Montes en la realización de los experimentos de secado y obtención de los datos experimentales dentro del marco del proyecto "Estudio experimental de los efectos de la periodicidad secado-rehumidificación de granos almacenados en un silo secador".

Se realizaron las simulaciones de varios de los experimentos para obtener una expresión mejorada del coeficiente de "difusividad aparente", descrito previamente. Esto representa un avance sobre el trabajo reportado en la ref. 29, pues dicho coeficiente considera variaciones ambientales, de aporte de energía y efectos de rehumidificación.

3.1 Descripción del equipo y aparatos empleados

En la fig. 7 puede verse el sistema de secado solar de granos y los aparatos de medición empleados. El silo número uno está en lámina galvanizada calibre 22, las dimensiones de la cámara de granos y la de distribución de aire son $0.80 \times 0.60 \times 0.15$ m y $0.80 \times 0.60 \times 0.05$ m respectivamente; el orificio de admisión y el de salida de aire tienen 0.10 m de diámetro. El silo número dos está en lámina galvanizada calibre 20, las dimensiones de la cámara de granos y la de distribución de aire son $0.60 \times 0.20 \times 0.73$ m y $0.60 \times 0.20 \times 0.07$ m respectivamente, el orificio de admisión y el de salida de aire tienen 0.10 m de diámetro.

Las cámaras de distribución de aire de los silos empleados pueden verse en la fig. 8 constituidas de lámina galvanizada, calibre 22, perforada con brocas de diámetros adecuados, y de malla metálica número 8 sobre la cual descansa el maíz; las perforaciones están distribuidas de tal manera que al pasar la corriente de aire a través de éstas, se tenga una velocidad uniforme del aire en toda el área de la lámina, a una distancia de 0.015 m. Las dimensiones del colector solar plano son $0.99 \times 0.54 \times 0.20$ m; está constituido de virutas de metal ferroso y de botes metálicos, cilíndricos, sin fondo de 0.60 m de diámetro y 0.13 m de altura. Tanto las virutas como los botes están pintados de color negro mate. El colector tiene una cubierta de vidrio de 0.003 m de espesor, está orientado al sur con una inclinación de 20° y no está aislado térmicamente.

El moto-ventilador utilizado en el secado de maíz es de tipo centrífugo de aspas hacia el frente con potencia de 41.4 watts. En la fig. 9 puede verse el horno, la balanza y el desecador de vidrio, empleados en la determinación de la humedad del maíz.

Los aparatos de medición empleados durante las pruebas de secado fueron: Un teletermómetro de 11 canales, seis termistores, tres termómetros de laboratorio, un kilowatthorímetro, un piranómetro Eppley, un anemómetro de

filamento, un multímetro digital, un flexómetro y una balanza granataria.

3.2 Descripción de los experimentos de secado.

El maíz utilizado en el primero y segundo experimentos fue criollo, color amarillo, cosechado el 16 de septiembre de 1986 en el estado de Hidalgo; el utilizado en el tercero y cuarto experimentos fue amarillo, de variedad desconocida, cosechado el 15 de noviembre de 1986 en Santa Cruz Acalpíxca, Xochimilco, México. Las mazorcas de maíz estuvieron almacenadas a una temperatura de 7°C sin que sufrieran rehumidificación (ver figs. 10 y 11).

El primer experimento se inició el 28 de octubre de 1986. Para determinar el contenido de humedad del grano se empleó el método de horno a 130°C ± 1°C³⁴, el cual consiste en emplear una etapa si el contenido de humedad es menor que 13%, y dos etapas si el contenido de humedad es mayor que 13%. Cuando se emplea una etapa, se machacan dos muestras de dos a tres gramos cada una, se secan en el horno a 130°C durante una hora, se enfrían en un recipiente cerrado que contenga un agente deshidratante y posteriormente se pesan. El contenido de humedad de las muestras no debe variar en más de 0.1%. Cuando se emplean dos etapas, se toman dos muestras de 25 a 30 g. cada una, se secan en el horno hasta que tengan una humedad menor a 13%, posteriormente se aplica el procedimiento de una etapa (ver fig. 9).

El contenido de humedad con base en el peso húmedo se calculó por diferencia de peso entre el peso original de la muestra (peso húmedo) y el peso después del secado en la estufa (peso seco); por tanto,

$$\% \text{ humedad (base húmeda)} = \frac{A}{P_h} \times 100$$

en donde A = pérdida de agua en gramos; la diferencia entre peso húmedo y seco.

P_h = peso húmedo de la muestra.

El porcentaje de humedad con base en el peso seco se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad (base seca)} = \frac{A}{P_s} \times 100$$

en donde P_s = peso seco de la muestra, en gramos.

El silo número uno se cargó a las 9 hrs, con 40, kg de maíz amarillo criollo, desgranado manualmente (fig. 12) con un contenido de humedad (inicial) de 43.2% b.s. (30.17% b.h.). La carga se dividió en dos estratos de 0.05 m de espesor, por medio de una malla plástica número 5. Se inyectó aire precalentado por el colector solar, en la parte inferior del silo, con un caudal promedio de 160 kg/hr m^2 . El moto-ventilador se operó en forma continua durante 197 hrs.

La velocidad promedio del aire a la entrada del silo se midió con un anemómetro de filamento y la temperatura promedio, a la salida del colector, se midió con dos termistores colocados a la salida del colector y a la entrada del moto-ventilador. Las temperaturas a la entrada y a la salida del silo también se midieron con termistores (ver fig 13). La temperatura del grano se midió con un termistor colocado en la parte media de la altura del lecho de granos. Las temperaturas del bulbo húmedo (T_{bh}) y bulbo seco (T_{bs}) del ambiente se midieron con un termómetro de bulbo húmedo y con un termistor apropiado respectivamente. La radiación solar incidente sobre el colector solar plano se midió con un piranómetro Eppley, el cual se colocaba sobre la cubierta del colector sólo a la hora de tomar la medición.

Para determinar las humedades de los estratos, durante los experimentos, se sacaban los estratos del silo y se mezclaba el maíz de cada estrato por separado, con el fin de homogeneizar la humedad en los estratos y obtener la humedad promedio de las dos muestras de cada estrato. Una vez extraídas las muestras, se introducían los estratos al silo continuando con el

experimento. El tiempo promedio utilizado para obtener las muestras fue de dos minutos por estrato.

El experimento número dos se inició el 20 de noviembre de 1986, a las 17:00 hrs. El silo número uno se cargó con 45 Kg de maíz amarillo criollo, desgranado manualmente, con un contenido de humedad (inicial) de 45.75% b.s. (31.38% b.h.). La carga se dividió en tres estratos de 0.05 m de espesor por medio de mallas plásticas número 5. Se tapó la mitad del colector para disminuir el incremento de temperatura del aire (fig. 14) que se inyectó por la parte inferior del silo, con un caudal promedio de 157 kg/hr m². El moto-ventilador se operó en forma continua durante 137 hrs.

El tercer experimento se inició el 5/XII/86, a las 9 hrs. El silo número uno se cargó con 36 kg de maíz desgranado manualmente (ver fig. 12), con un contenido de humedad (inicial) de 25.38% b.s. (20.24% b.h.). La carga se dividió en tres estratos de 0.033 m de espesor por medio de mallas plásticas número cinco. Se inyectó aire precalentado, por el colector solar, en la parte inferior del silo, con un caudal promedio de 83 kg/hr m². El moto-ventilador se operó continuamente durante 125 hrs.

El cuarto experimento se inició el 16/XII/86, a las 21 hrs. El silo número dos se cargó con 60 kg de maíz desgranado manualmente, con un contenido de humedad de 26.82% b.s. (21.15% b.h.). La carga se dividió en cinco estratos de 0.134 m de espesor. Se inyectó aire precalentado, por el colector solar, en la parte inferior del silo, con un caudal de 212 kg/hr m² durante 136 hrs.

3.3 Discusión de los resultados de secado

- a) Correspondientes al primer experimento.- En las figs. 15 y 16 pueden verse las variaciones de la radiación solar incidente sobre el colector solar y de la

humedad específica del ambiente (w) respectivamente. Esta última se obtuvo de la carta psicrométrica (fig A2 del apéndice) a partir de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo. Las curvas correspondientes están interrumpidas durante la noche porque no se tomaron mediciones en esos intervalos.

En las figs. 17 y 18 pueden verse las variaciones de la temperatura en el sistema de secado solar de granos. Al inicio del experimento, la temperatura del grano fue de 11°C y la del ambiente de 14°C , debido a que el grano no se atemperó antes de iniciar el experimento. También puede verse que durante las noches la temperatura de salida del colector (T_{sc}) fue menor que la temperatura ambiente (T_a) debido a la radiación del colector hacia el cielo. A partir de la hora 57, durante las primeras cinco horas de las noches, la temperatura del grano en la parte media del lecho (T_g) fue ligeramente mayor que la temperatura de entrada al silo (T_{es}) debido a la capacidad calorífica de los granos estimada en $2.026 \text{ kJ/kg K}^{26}$. Al transcurrir el tiempo de secado, durante las horas de insolación, la diferencia entre la T_g , la temperatura a la salida del silo (T_{ss}) y la T_{es} se hacía menor porque la cantidad de humedad removida disminuía, y la temperatura del aire que pasaba a través del grano ya no disminuía como en los primeros días de iniciado el experimento. En el intervalo 95-110 hrs., la lectura de la T_{ss} fue errónea porque el termistor que registraba esa temperatura estuvo fuera de operación. La fig. 19 muestra la variación del contenido de humedad del grano durante el experimento. A partir de la hora 60, durante las noches el estrato superior sufrió rehumidificación, por lo que ya no era conveniente operar el moto-ventilador durante ese tiempo, pero se siguió operando para estudiar el fenómeno de rehumidificación.

b) Correspondientes al segundo experimento.- La fig. 20 muestra las variaciones de la radiación solar incidente sobre el colector solar durante el experimento.

La fig. 21 muestra las variaciones de la razón de humedad del aire ambiente y la del aire a la salida del silo (W_s) durante el experimento. El área que se encuentra entre las curvas representa la cantidad de humedad removida o añadida al lecho de granos por kg de aire seco que pasó a través de él. Por ejemplo, entre la hora 48 y la 62 la razón de humedad del aire que sale del silo es menor a la del aire ambiente, lo que significa que el grano se rehumidificó. La w se incremento entre las horas 94-95 y 123-125 porque en ese tiempo hubo precipitación pluvial.

En la fig. 22 se muestran las variaciones de las humedades relativas del aire a la entrada (ϕ_{es}) y a la salida del silo (ϕ_{ss}). Los valores de la ϕ_{ss} entre las horas 32 y 40 son erróneos, pues no deberían ser menores a los de la ϕ_{es} porque en ese intervalo los granos perdieron humedad (ver fig 25).

En las figs 23 y 24 pueden verse las variaciones de las temperaturas en el sistema de secado solar de granos durante el segundo experimento. Al iniciar el experimento, la T_g fue de 12.5°C mientras que la T_a y la T_{es} fueron de 25°C y 27.75°C respectivamente. Esta diferencia causó un choque térmico en los granos provocando que sufrieran fisurs. Entre las horas 74 y 86, la medición de la T_g fue errónea porque después de sacar la muestra de granos el termistor correspondiente no permaneció en su sitio; en realidad la T_g fue mayor que la T_{es} y menor que la T_{ss} durante dicho tiempo. También podemos ver que durante las noches la ϕ llegó al 100% .

La fig. 25 muestra la variación del contenido de humedad del grano. A partir de la hora 74 las curvas tendieron a subir porque disminuyó la radiación solar, aumentó la ϕ_{es} , disminuyó la T_{es} y, la humedad de equilibrio del grano aumentó. También puede verse que ocurrieron varias rehumidificaciones; al hacer un análisis de éstos se pudo observar como la rapidez de variación de humedad es generalmente menor que durante el secado. Por ejemplo, a la hora 62 el grano del estrato inferior tuvo una humedad de 11.55% b.h., mientras que la T_{es} y la ϕ_{es} fueron de 8°C y 85.3% respectivamente; para los mismos valores de T_{es} y ϕ_{es} , durante el secado, la humedad del grano fue de 13.12% b.h., o sea que hubo una diferencia de 1.57% b.h.

- c) Correspondientes al tercer experimento.- La fig. 26 muestra la variación de la radiación solar incidente sobre el colector solar durante el periodo (5/XII/1986 - 10/XII/1986) de duración del experimento, iniciado a las 9 hrs. (tiempo local).

La fig. 27 muestra las variaciones de la razón de humedad del aire ambiente y la del aire a la salida del silo (W_s) durante el experimento. Los valores de W_s a las horas 23 y 78 son erróneos, pues no deberían ser menores a los de W porque a esas horas los granos perdieron humedad (ver fig. 31).

En la fig. 28 se muestran las variaciones de las humedades relativas del aire a la entrada (ϕ_{es}) y a la salida del silo (ϕ_{ss}) los valores de la ϕ_{es} a las horas 23 y 78 son erróneos pues no deberían ser menores a los de la ϕ_{es} porque en esas horas los granos perdieron humedad (ver fig. 31).

En las figs. 29 y 30 pueden verse las variaciones de las temperaturas en el sistema de secado solar de granos durante el experimento. Al inicio del

experimento la T_g fue de 12.25°C mientras que la T_a y la T_{es} fueron de 12.75 y 19.75°C respectivamente; o sea que el ΔT que sufrió el grano fue de 7.5°C . Entre el intervalo 4-7 hrs. los valores de la T_{es} se tomaron erróneamente, pues no deberían ser mayores a los de la T_g porque en ese intervalo los granos perdieron humedad (ver fig. 31). A partir de la hora 19, durante la mayor parte del tiempo de secado, la T_{es} fue muy parecida a la T_a porque el ángulo de incidencia (θ) de los rayos solares sobre la tapa del silo fue disminuyendo, aumentando el calor ganado por esta última y calentando el aire a la salida del silo. La fig. 31 muestra las variaciones del contenido de humedad del grano durante el experimento. Podemos ver que cuando la masa de granos del estrato inferior estuvo en el secado comprendido entre las 22-24 hrs. tuvo una humedad de 12.74% (b.h.), y la T_{es} y la ϕ_{es} fueron de 12.5°C y 70.2% respectivamente, mientras que en la rehumidificación comprendida entre las horas 106-118, a la misma T_{es} y ϕ_{es} , la masa de granos de ese estrato tuvo una humedad de 10.80% (b.h.); o sea que hubo una diferencia de 1.94% (b.h.). Esto quiere decir que si el aire tiene capacidad para secar un producto hasta 13% (b.h.) el mismo aire húmedo podrá rehumedecer granos secos hasta una cantidad de humedad entre 10.5 y 11.5% (b.h.).

- d) Correspondientes al cuarto experimento.- En la fig. 32 podemos ver la variación de la radiación solar incidente sobre el colector solar durante el periodo (16/XII/1986 - 22/XII/1986) de duración del cuarto experimento iniciado a las 21 hrs (tiempo local).

La fig. 33 muestra las variaciones de la W y la W_s durante el experimento. Podemos ver que el inicio del secado fue en la noche y que durante el periodo cero-9 hrs. se logró remover una buena cantidad de humedad del grano (1.36 kg de agua, ver fig 37).

En la fig 34 se muestran las variaciones de las humedades relativas del aire a la entrada (ϕ_{es}) y a la salida del silo (ϕ_{ss}). Las figs. 35 y 36 muestran las variaciones de las temperaturas en el sistema de secado solar de granos durante el experimento. Entre el intervalo 126-131 hrs, la medición de la T_{ss} fue erróneo porque el agua del termómetro de bulbo húmedo estuvo mojando el termómetro del bulbo seco; en realidad la T_{ss} fue mayor que la T_{es} y menor que la T_g durante dicho intervalo.

La fig. 37 muestra las variaciones del contenido de humedad del grano durante el experimento. Durante el periodo 46-58 hrs. los dos últimos estratos (de abajo hacia arriba) se rehumedecieron porque la chimenea del silo estuvo abierta, penetrándole la escasa precipitación pluvial que se presentó en la madrugada. En el intervalo 69-82 hrs. podemos ver que los tres primeros estratos se rehumedecieron disminuyendo la humedad del aire por lo que éste pudo remover humedad de los dos estratos superiores. Podemos ver que a partir de la hora 44, durante las noches ya no era conveniente operar al moto-ventilador porque todos los estratos se rehumidificaban. Al hacer un análisis del estrato inferior notamos que en su primer rehumedecimiento, a la hora 81, su humedad fue de 11% b.h. mientras que la ϕ_{es} y la T_{es} fueron de 83% y 7.4°C (lo que indica una humedad de equilibrio de 18.2%) respectivamente; para los mismos valores de ϕ_{es} y T_{es} , en el secado (hr.35), la humedad del grano fue de 13% b.h.; es decir que hubo una diferencia de 2% b.h. entre las humedades del estrato.

3.4 Descripción de la evaluación experimental del colector cilíndrico de plástico.

El experimento fue realizado por Gutiérrez F. y Tovar R^a.; se

inició el 12/IX/85 a las 12:15 horas (tiempo local). Consistió en exponer el captador solar a las condiciones del medio ambiente y evaluar la eficiencia de conversión de energía solar en calor útil a varias temperaturas de operación superiores a las del ambiente.

Para ello se instaló el equipo experimental como se menciona en seguida. El colector en polietileno de baja densidad, color negro, de 11m de longitud, 0.45 m de diámetro y 14×10^{-5} m de espesor, se instaló en la dirección este-oeste y a una altura, respecto al suelo, de 1.10 m. El flujo de aire se hizo pasar a través del colector solar por medio de un moto-ventilador centrífugo de aspas rectas de 1.1185 kW (1.5 HP) en cuya entrada se añadió un regulador de flujo. Se usaron termopares tipo "T" (cobre-constantán) para medir la temperatura del ambiente (T_a), las temperaturas del aire a la entrada (T_e) y a la salida (T_{sc}) del colector solar. La velocidad del flujo de aire se midió con un anemómetro tipo aerogenerador colocado en la salida del colector y la radiación solar se midió con un piranómetro Eppley colocado en un plano horizontal (ver figs. 38 y 39). Se tomaron 30 lecturas con intervalos de 30 segundos.

Como todas las variables produjeron una señal eléctrica en los sensores, se utilizó un graficador de 24 canales para su registro simultáneo. Posteriormente se utilizó un sistema computarizado de 20 canales para registrar y procesar la información (fig. 40).

3.5 Discusión de los resultados de la evaluación del colector

La fig. 41 muestra las variaciones de T_a , q , T_e , T_{sc} y G . Podemos ver que entre la temperatura del aire ambiente y la del aire a la entrada del colector hay una diferencia promedio de 5.5°C aproximadamente, porque el ventilador y el distribuidor del aire (ver fig. 38) le incrementaron su temperatura. El incremento de temperatura del aire al pasar a través del

colector varió entre 0.4 y 2.8°C, porque la irradiancia, el gasto volumétrico específico, la T_a y la velocidad del viento variaron. La irradiancia sobre el colector solar se calculó empleando las ecuaciones (1.6.4), (1.6.10), (2.15.7), y la teoría dada en las páginas 62-73 de la ref (24) y considerando una reflectancia del piso (concreto) de 0.3. Se midió la transmitancia de una muestra del plástico del colector y el promedio resulto ser 0.023. La velocidad promedio del viento fue de 0.5 m/s aproximadamente.

4

CORRELACION TEORICO-EXPERIMENTAL

4.1 Determinación del coeficiente de difusividad aparente del maíz.

Para determinar el coeficiente de difusividad aparente se cargó al silo No. dos con 67 kg de maíz de la misma cosecha que el empleado en el experimento cuatro. Como se hizo variar el flujo másico del aire (212.2 kg/hr m^2 durante el día y 164.72 kg/hr m^2 durante la noche), para determinar los efectos que éste ocasiona en el contenido de humedad y calidad de los granos, sólo se tomaron en cuenta los siguientes datos (columnas 1,2 y 4 de la tabla 4) obtenidos durante el día.

Tabla 4

\bar{X} (b.h.) del lecho	Disminución de la altura de la cama de granos(m) \mp 0.0005		Tiempo** (hr)	$D^* \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{hr}$ preliminar
(1)	(2) ¹	(3) ²	(4)	(5)
0.207	0.0235	0.0147	3.000	71.6776
0.196	0.0208	0.0129	3.700	45.6742
0.169	0.0193	0.0120	6.000	24.2558
0.136	0.0153	0.0095	8.166	11.1611

1 Medida

2 Corregida

Para obtener la disminución corregida de la altura del lecho de granos, (columna 3 de la tabla 4) se determinó experimentalmente la porosidad de la cama del maíz empleado, de la siguiente manera: se colocaron medio litro de maíz seco (13% b.h.) y medio litro de agua en vasos de precipitados de 500 ml de capacidad, se vertió rápidamente el agua en el vaso con maíz hasta que empezó a derramarse, el agua derramada se añadió al vaso que sólo contenía agua, determinándose el porcentaje de agua que se vertió en el medio litro de maíz; esta operación se repitió tres veces, cada vez se cambió el maíz y se secó el vaso, determinándose una porosidad media de 37.6%. Una vez determinada la porosidad, se definió la disminución corregida*** de la altura del lecho de granos como el 62.4% (100-37.6%) de la disminución, medida de la altura del lecho. La D^* preliminar (columna 5 de la tabla 4) es el cociente del cuadrado de la disminución corregida entre el tiempo, en horas, en que ocurrió dicha disminución. Con los valores de \bar{X} en el eje de las abscisas y los de D^* preliminar en el eje de las ordenadas se ajustaron los datos a una curva exponencial dada por

$$D^* \text{ preliminar} = (k e^{m\bar{X}}) \times 10^{-6} \quad (45)$$

donde $k = 0.338$ y $m = 25.445$

con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.991$, esta

** Tiempo durante el cual ocurrió la disminución

*** La disminución corregida es la que tendría sólo la masa de granos

ecuación se usó para correr el programa de simulación del secado en el lecho de granos; se observó que los resultados teóricos descendían más rápido que los experimentales, por tal motivo se decidió dividir a los coeficientes k y m entre 100; se volvió a correr el programa, resultando una mejor correlación. Fue necesario hacer variar k para tener una buena correlación con cada uno de los experimentos, porque el maíz se secó más rápido en unos que en otros, dependiendo de T_{es} . En los resultados de tres experimentos se observó que más del 50% del secado ocurrió durante las primeras 10 hrs; por tal motivo se promedió T_{es} durante ese tiempo en cada uno de los experimentos, obteniéndose la tabla cinco.

Tabla 5

Experimento	$\bar{T}_{es} (^{\circ}C)$	k
1	22.40	0.013
2	15.86	0.010
3	27.13	0.020
4	07.56	0.004

Con los valores de \bar{T}_{es} en el eje de las abscisas y los de k en el eje de las ordenadas se ajustaron los datos a una curva potencial dada por la ecuación

$$k = 0.354 \times 10^{-3} T_{es}^{1.1985} \quad (46)$$

por lo tanto D^* definitivo resultó ser:

$$D^* = (0.354 \times 10^{-3} T_{es}^{1.1985} e^{0.254\bar{X}}) \times 10^{-6} \quad (47)$$

Nótese la diferencia de la ecuación (47) con la ecuación (34)

La fig. 42 muestra la variación de D^* vs humedad del grano.

4.2 Comparación entre los resultados teóricos y experimentales del secado en el lecho de granos

Substituyendo la ecuación 34 por la 47 en el modelo matemático del secado en el lecho de granos, se realizaron corridas en

computadora empleando los datos medidos de W_{es} y T_{es} para cada una de las pruebas experimentales para simular el proceso de secado (ver el diagrama de flujo en la fig A4). Considerando promedios de las humedades medidas de cada estrato (para cuatro de las pruebas experimentales), se obtuvo la siguiente correlación teórico experimental, descrita por las figs. 43, 44, 45 y 46. En la relación del tercer experimento podemos ver que los dos últimos grupos de los resultados experimentales están bastante altos, con respecto a los resultados teóricos, porque la chimenea del silo estuvo abierta y le cayó rocío al maíz durante cuatro horas; por tal motivo no se tomaron en cuenta para determinar el error promedio de la correlación.

El error promedio total de la simulación del secado en el lecho de granos es de $\pm 14\%$, este error incluye los obtenidos en: las lecturas de las temperaturas que fue del orden de $\pm 2\%$, la determinación de la humedad del grano considerado en $\pm 0.6\%$, la determinación de la humedad específica del aire estimado en $\pm 3\%$, la medición del caudal de aire que fue de $\pm 3\%$, y al obtenido en la comparación entre los resultados teóricos y experimentales que fue de $\pm 5.43\%$. Ya que es un error razonable, hay motivos suficientes para aceptar que el modelo de simulación es correcto.

4.3 Correlación teórico-experimental del colector cilíndrico

El programa del modelo de simulación se corrió considerando una reflectancia promedio del plástico de 0.297^{36} y una conductividad térmica del colector de $0.42 \text{ W/m } ^\circ\text{C}^{37}$.

Podemos ver en la fig 41 que la correlación es bastante aceptable, tiene un error promedio de 1.05% . Los resultados del modelo numérico están dados por la línea continua.

APLICACIONES DE LA SIMULACION DEL SECADO SOLAR DE MAIZ

El programa de simulación del colector solar, a pesar de que no es adecuado para pronosticar el incremento de temperatura real que se tiene durante el secado (porque simula el funcionamiento de un colector suspendido y no el de uno apoyado en el piso), y el del secado en el lecho de granos se unieron para dar origen al programa de simulación del secado solar de maíz en silos estacionarios (en el apéndice A se muestra el listado).

Para la ejecución del programa fue necesario, entre otras consideraciones, expresar la longitud del colector L_c en función de L_c/D_c . Para ello se obtuvo la curva mostrada en la fig 47, la cual indica la variación de $\frac{\dot{m} C_{pa} \Delta T_a}{G_T D_c^2}$ con respecto a $\frac{L_c}{D_c}$. Se decidió tomar $L_c = 35 D_c$ porque a partir de $\frac{L_c}{D_c} = 35$,

el incremento de la ordenada de la curva es muy pequeño y porque el incremento de temperatura del aire que se tiene después de $L_c = 30 D_c$ aún es importante para el secado.

En los silos estacionarios, la mayor parte del daño ocurre en la cima del lecho de granos porque es la última parte en secarse. Los tiempos de almacenamiento seguro para granos de maíz a varias temperaturas y contenidos de humedad se muestran en la fig 48^{ap}.

Los datos climatológicos y los promedios mensuales de las radiaciones máxima total y directa, correspondientes al mes de octubre, necesarios para ejecutar el programa de simulación, fueron tomados de las referencias 27,28 y 38 (ver tabla 6).

La fig 49 y la tabla 7 muestran los resultados de la simulación del secado solar de maíz para algunas regiones productoras en México, cuando se tiene una carga de 10 toneladas de grano y el flujo de aire es continuo (día y noche). El valor de la humedad adimensional (dado por $\chi = \frac{X_i - X_f}{X_c - X_f}$), del grano, 1 corresponde a 28.2% de humedad b.s. y el 0 a 10% b.s. La altura del lecho de granos se dividió en cinco estratos. Cada una de las cinco curvas, de abajo hacia arriba, muestra el promedio del contenido de humedad del estrato correspondiente. Podemos ver que para los mismos valores de humedad inicial del grano ($\chi_i = 0.22$) y altura del silo ($h_s = 4$ m); tenemos diferentes requerimientos de gasto específico de aire (q) y área de colector, porque las condiciones climatológicas son diferentes (ver tabla 6). Nótese que, para el caso de Hecelchakan, cuando $\chi_i = 0.28$ y $h_s = 1$ m, los requerimientos de q son de $10 \text{ m}^3/\text{min t}$, mientras que para el caso de Ciudad Victoria, cuando $h_s = 4$ m, los requerimientos de q son de $5.2 \text{ m}^3/\text{min t}$. y para el caso de Guaymas cuando $h_s = 5$ m, los requerimientos de q son de $5 \text{ m}^3/\text{min t}$. Con estos ejemplos, se dispone de una herramienta para el diseño aproximado y rápido de sistemas secadores solares estacionarios de maíz.

Tabla 6

	Hecelchakan Camp.	Cd. Victoria, Tamps.	Guaymas, Son.
Latitud(°)	20.2	25.5	27.6
T _{máx} (°C)	32.0	30.1	37.6
T _{mín} (°C)	20.7	18.1	15.5
T (°C)	26.3	27.0	27
P _{atm} (kpa)	101.3	101.2	101.3
Φ (dec.)	0.80	0.69	0.49
G(KW/m ²)	0.65	0.550	0.800
G _b (KW/m ²)	0.45	0.350	0.650
V (m/s)	1.37	2.87	1.83

Donde G es la radiación máxima media mensual
 G_b es la radiación directa máxima media
 mensual (ver apéndice).

Tabla 7

	Hecelchakan, Camp.		Cd. Victoria, Tamps.		Guaymas, Son.	
X _i (dec. b.s.)	000.28	00.22	000.28	00.22	000.28	000.22
h _s (m)	001.00	04.00	004.00	04.00	005.00	004.00
A _s (m ²)	015.72	03.58	003.78	03.58	003.02	003.60
L _c (m)	033.17	19.38	023.00	11.19	011.19	011.19
D _c (m)	000.95	00.55	000.66	00.32	000.66	000.32
q (m ³ /mín t)	010.00	02.60	005.20	01.40	005.00	000.90
α (adim)	2.00	3.00	4.00	1.00	5.00	1.00
t _{as} (hr)	144.00	650.00	144.00	650.00	144.00	650.00
H _{u cm} (adim.)	0.45	0.55	0.80	0.42	0.31	0.11
η _c (%)	14.20	11.20	10.00	09.00	14.40	11.00

Done t_{as} es tiempo de almacenamiento seguro

H_{u cm} es la humedad del cm de grano que se encuentra
 en la cima del lecho.

6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El análisis de los resultados teóricos y experimentales arrojan las siguientes conclusiones. La temperatura, la humedad específica y el gasto de aire a la entrada del silo, la humedad y temperatura del grano son las variables que tienen más influencia en la velocidad del secado; el calentamiento producido por el ventilador (de 1 a 2°C) reduce la humedad relativa del aire de 8 a 15 puntos porcentuales cuando se trata de aire saturado; Debido a la capacidad calorífica del maíz, cuando los estratos inferiores se han sobre secado, estos funcionan como un almacén térmico, calentando y secando al aire, favoreciendo el secado de los estratos superiores durante las noches o durante períodos cortos de nubosidad. La rapidez de variación del rehumedecimiento de los granos, bajo

condiciones similares es menor que durante el secado; por ejemplo cuando la masa de granos se esté secando, y su humedad sea 13% (b.h.), el aire que la esté secando tendrá una humedad relativa y temperatura determinadas; cuando la masa de granos secos (con humedad menor a 10% b.h.), se esté rehumedeciendo y la temperatura y humedad del aire sean las anteriores, la humedad del grano estará entre 10.5 y 11.5% (b.h.). La selección del aumento del flujo o aumento de la temperatura del aire se debe hacer en función del potencial de secado del lugar donde se encuentre instalado el silo. El "coeficiente de difusividad aparente" es muy importante en la simulación del secado. Los resultados del modelo matemático de simulación del secado de maíz se ajustan razonablemente bien a los resultados experimentales lo que significa que el modelo matemático es útil para pronosticar el secado solar de maíz en silos estacionarios y es una herramienta que nos permite determinar: el tamaño del colector, el gasto de aire requerido, el tamaño del silo, el tiempo aproximado de secado y la humedad final de la cama de granos.

6.2 Recomendaciones

Con el fin de asegurar la confiabilidad del modelo de simulaciones es muy importante que se comparen los resultados gráficos de la simulación del secado solar de granos con resultados prácticos, es decir, que se instalen los colectores tubulares en los silos existentes en algún estado de nuestro país y se registren los datos necesarios para realizar la comparación; si al comparar los resultados teóricos con los prácticos el error resultante es aceptable, como se espera, entonces será posible realizar nomogramas para que nos auxilien en el diseño aproximado y rápido de sistemas estacionarios de secado solar de granos; de lo contrario sería conveniente afinar el programa de simulación.

Por otra parte, como los colectores de plástico se pueden romper cuando se operan a altas presiones, en la fig. 50 se

muestra la presión máxima de operación recomendada de un ducto de polietileno de baja densidad, en función de su diámetro y espesor.

Es importante que el colector solar se sujete al piso e instalar un dispositivo interruptor de corriente para desenergizar al moto-ventilador cuando la velocidad del viento sea alta, por ejemplo mayor a cinco m/s, para que el colector cilíndrico se colapse y evitar que el viento lo arrastre.

FIGURAS

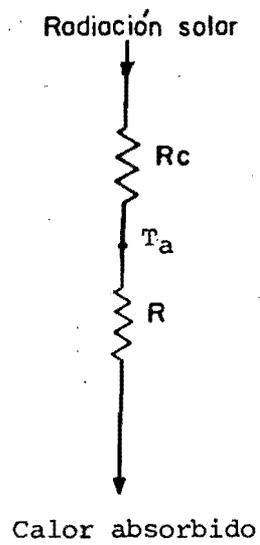
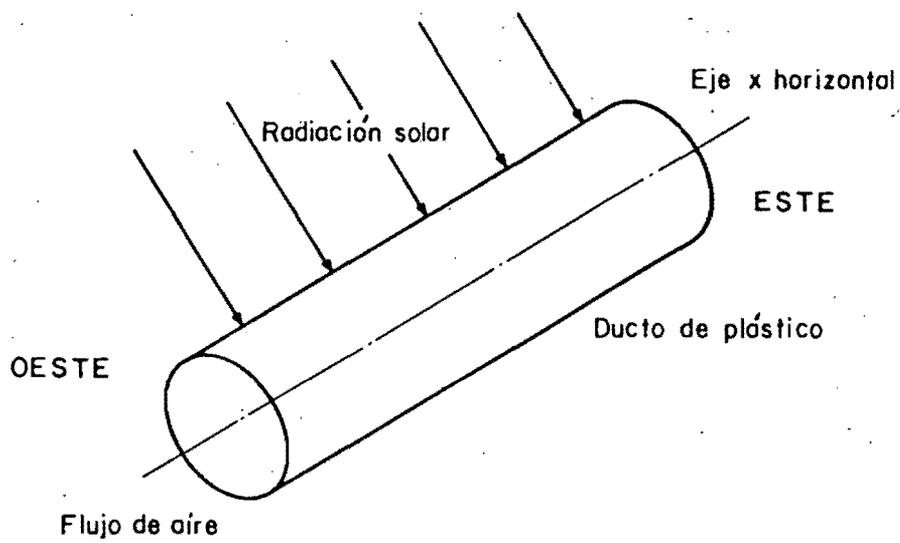


Fig 1 Representación esquemática de un colector tubular y de su correspondiente diagrama de pérdidas térmicas

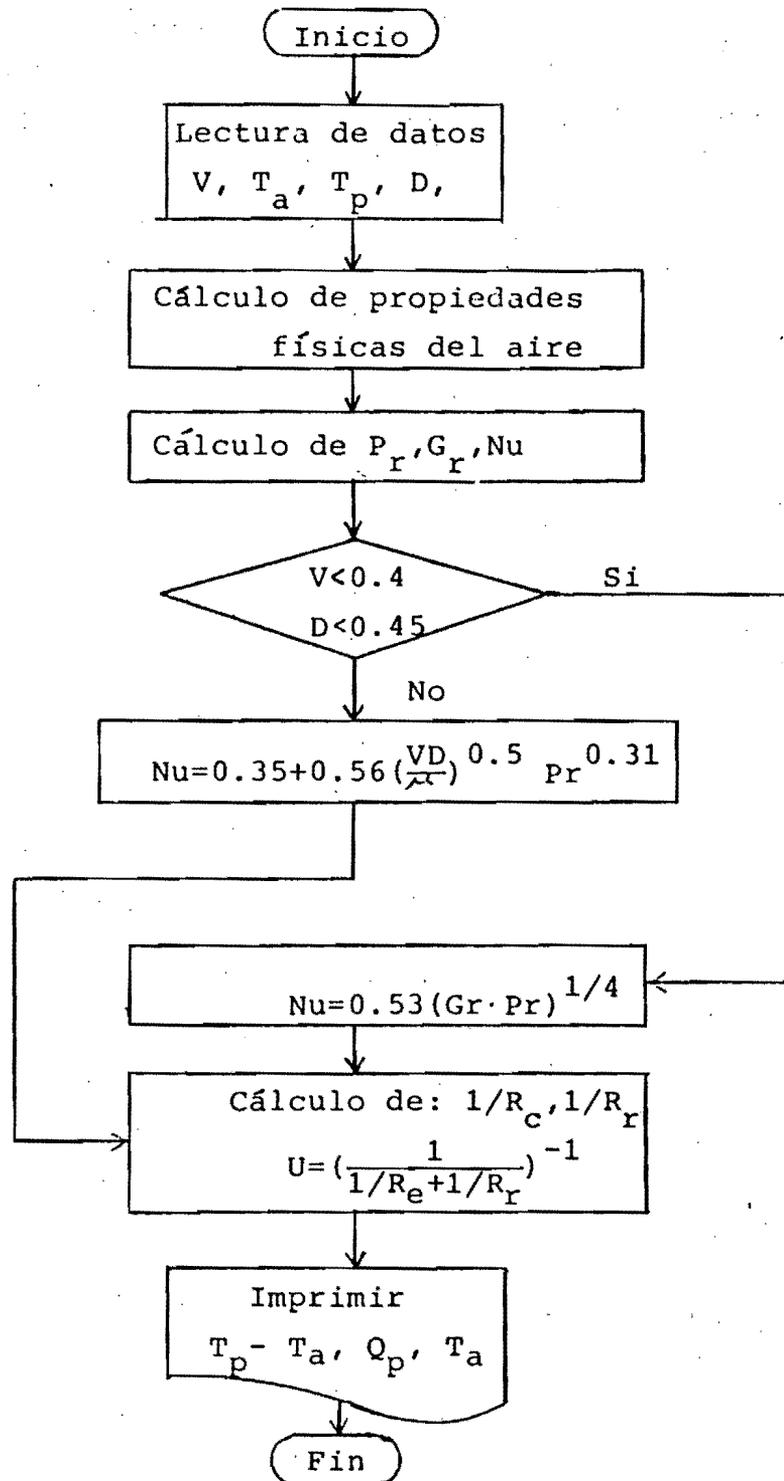


Fig. 2 Diagrama de flujo para el cálculo de las pérdidas térmicas en el colector tubular.

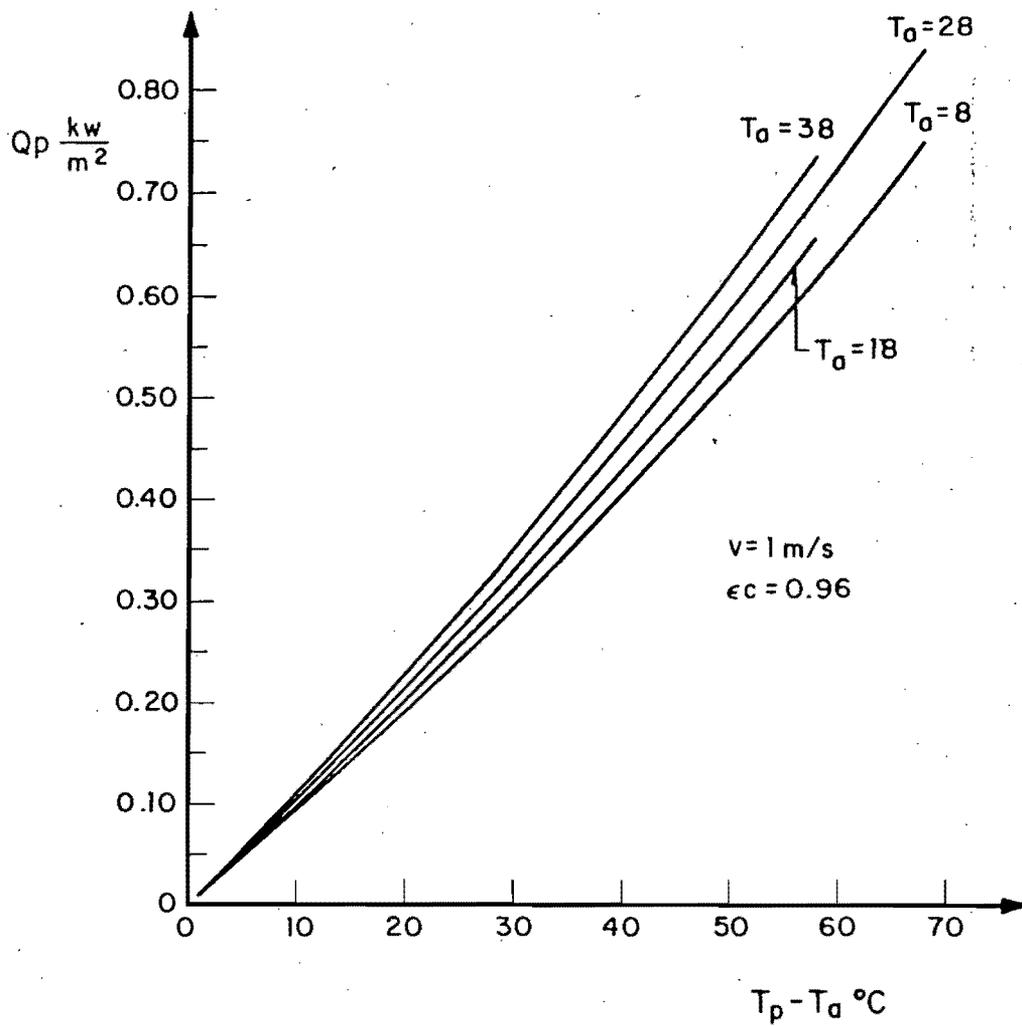


Fig 3 Pérdidas térmicas totales del colector cilíndrico como función de $T_p - T_a$ para cuatro valores diferentes de T_a con $\epsilon c = 0.96$ y $v = 1 \text{ m/s}$.

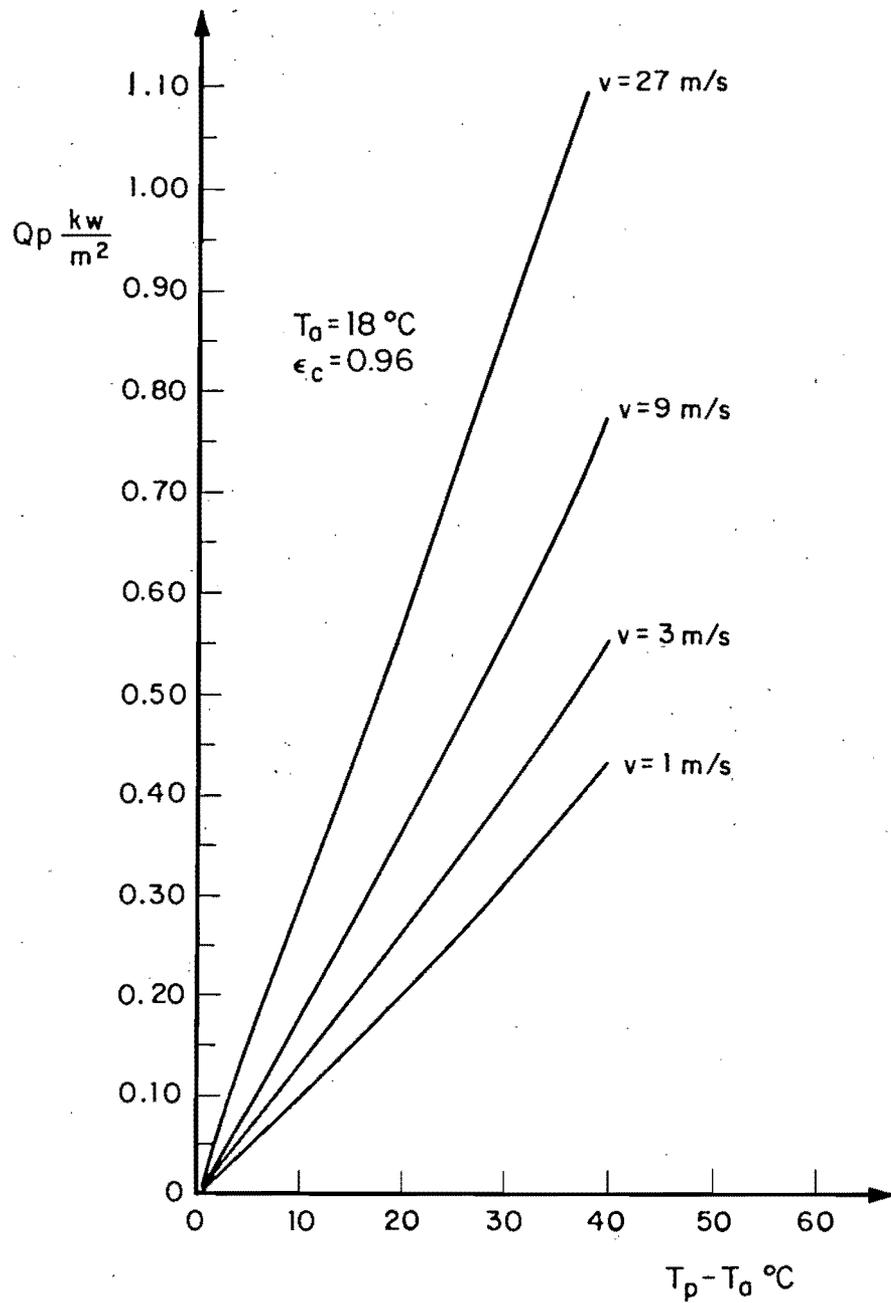


Fig 4 Pérdidas térmicas totales del colector cilíndrico como función de $T_p - T_a$ para varios valores de V , con $\epsilon_c = 0.96$ y $T_a = 18 \text{ }^{\circ}C$

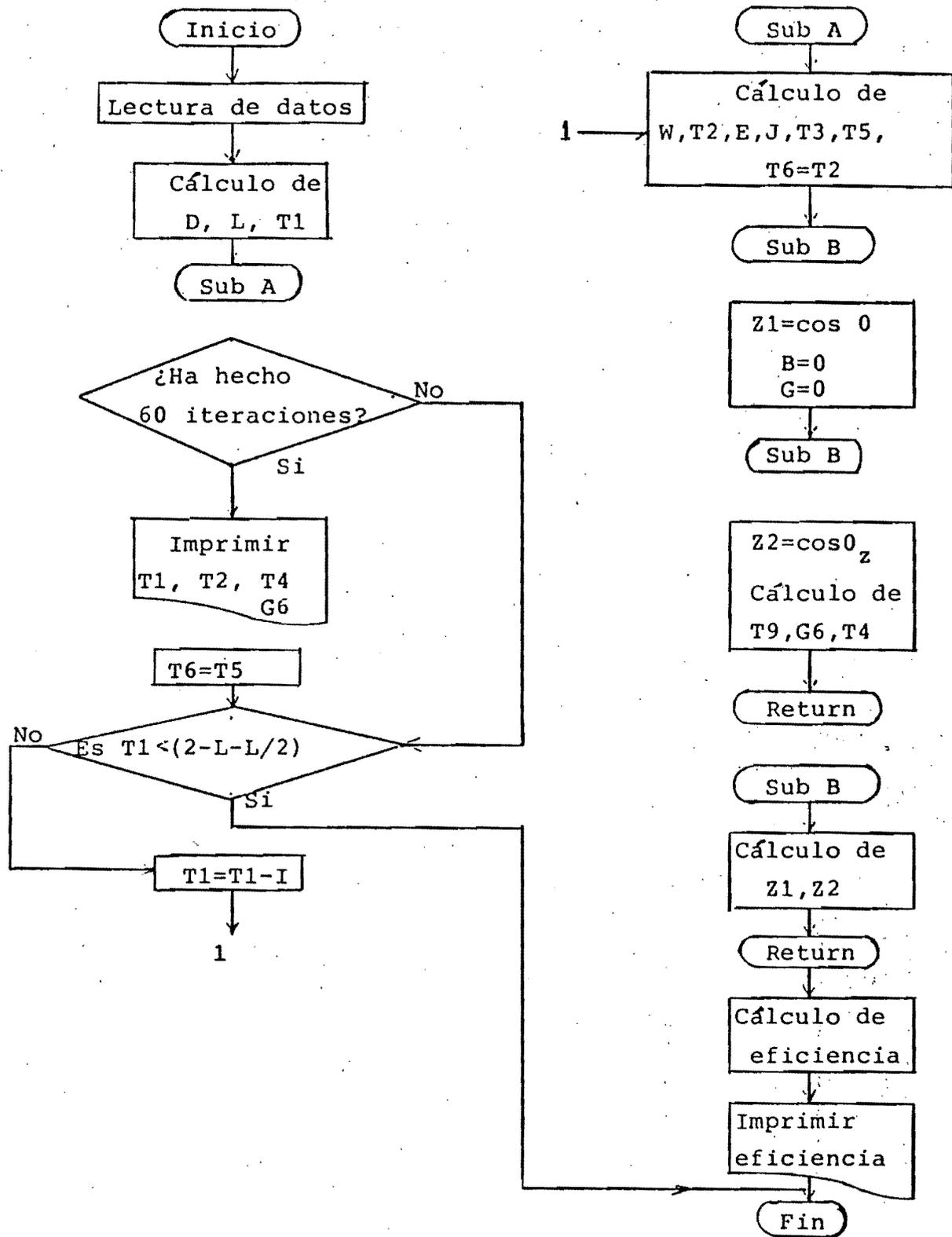


Fig. 5 Diagrama de flujo para calcular la temperatura final del aire.

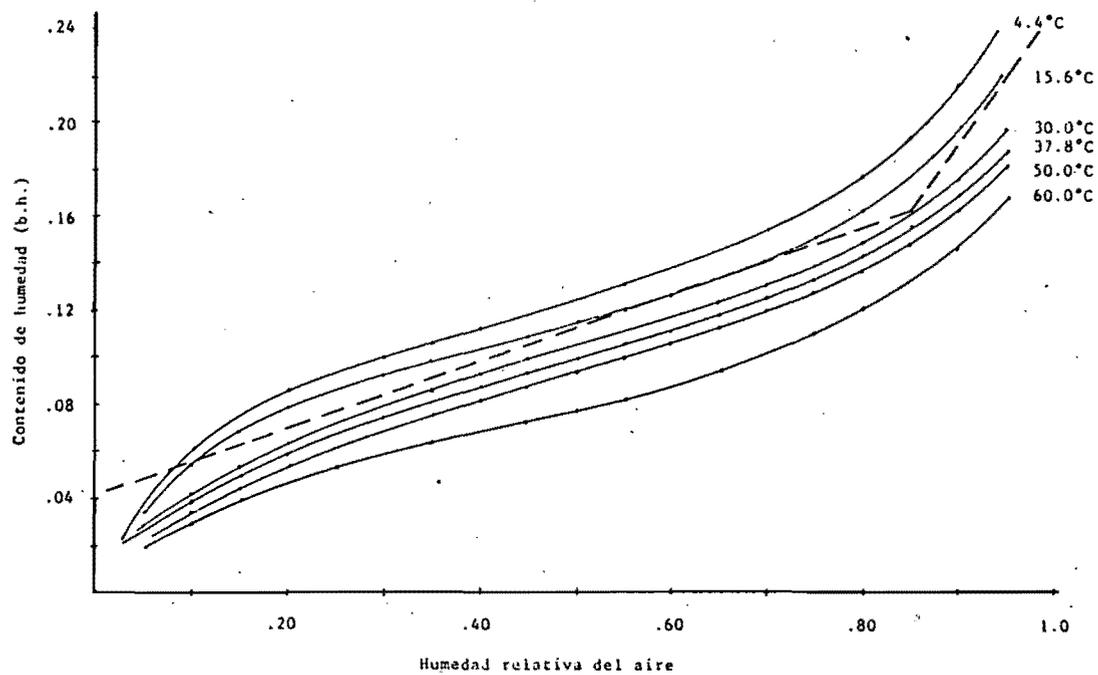


Fig 6 Curvas de humedad de equilibrio para el maiz (Rodríguez-Arias 1956), comparadas con la ecuación de Ramírez Genel (1966).
Fuente: ref. 20.

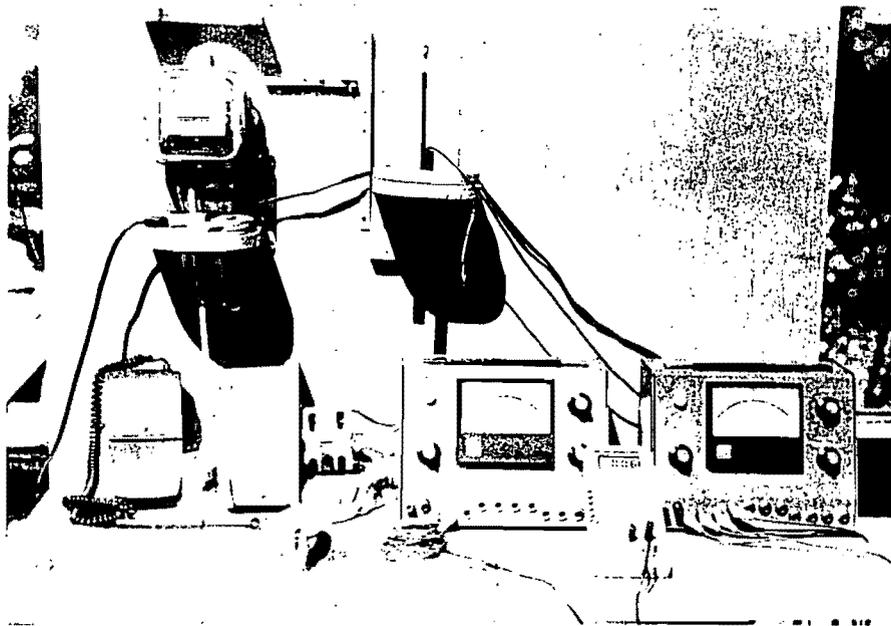
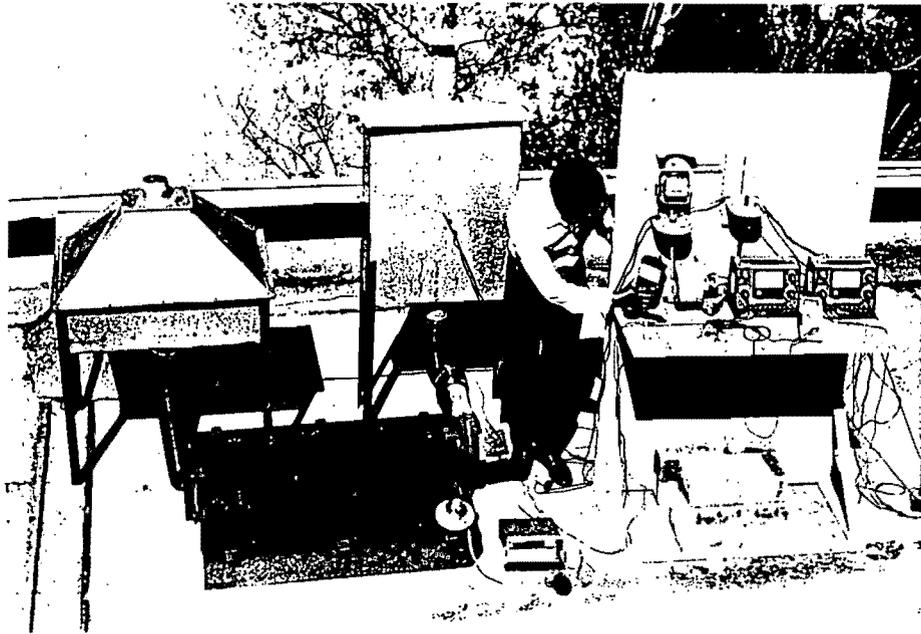


Fig. 7 Sistema de secado solar de granos y aparatos de medición empleados.
El silo número uno es el de menor altura.



Fig. 8 Cámara de distribución de aire del silo número uno.

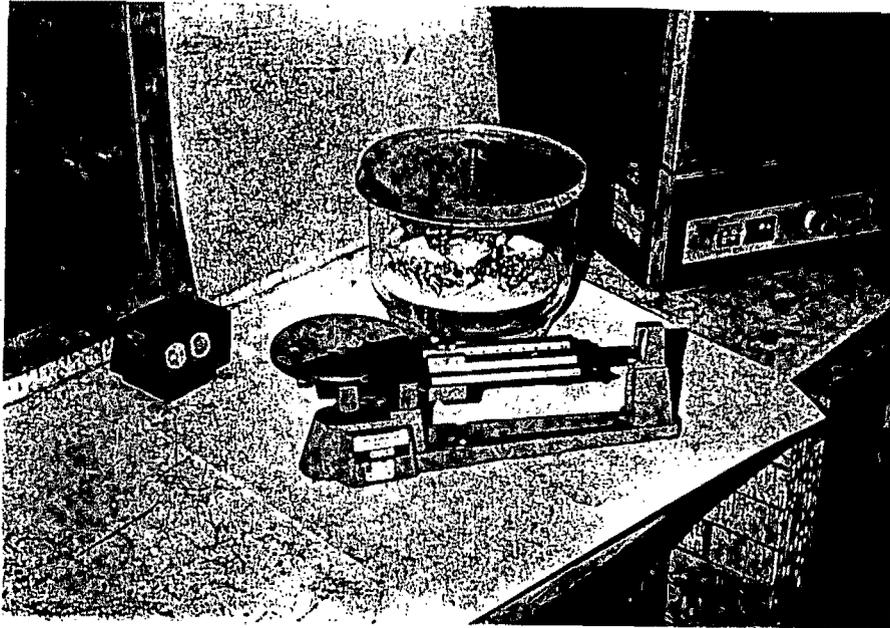


Fig. 9 Equipo utilizado en la determinación de la humedad del maíz.



Fig.10 Mazorcas de maíz amarillo, de variedad desconocida, utilizado en el tercero y cuarto experimentos.

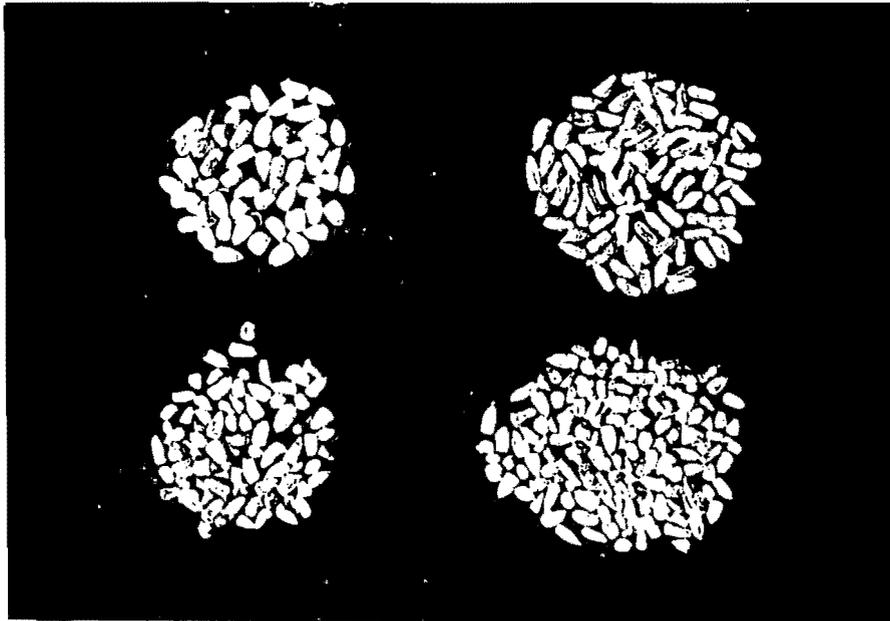


Fig.11 Las muestras de la parte superior son húmedas y las de la inferior secas; las del lado derecho corresponden a la variedad utilizada en los experimentos uno y dos y, las del izquierdo a la utilizada en los experimentos tres y cuatro.



Fig. 12 Las mazorcas se desgranaron manualmente para no dañar al maíz y, no alterar su coeficiente de difusividad ni su viabilidad.

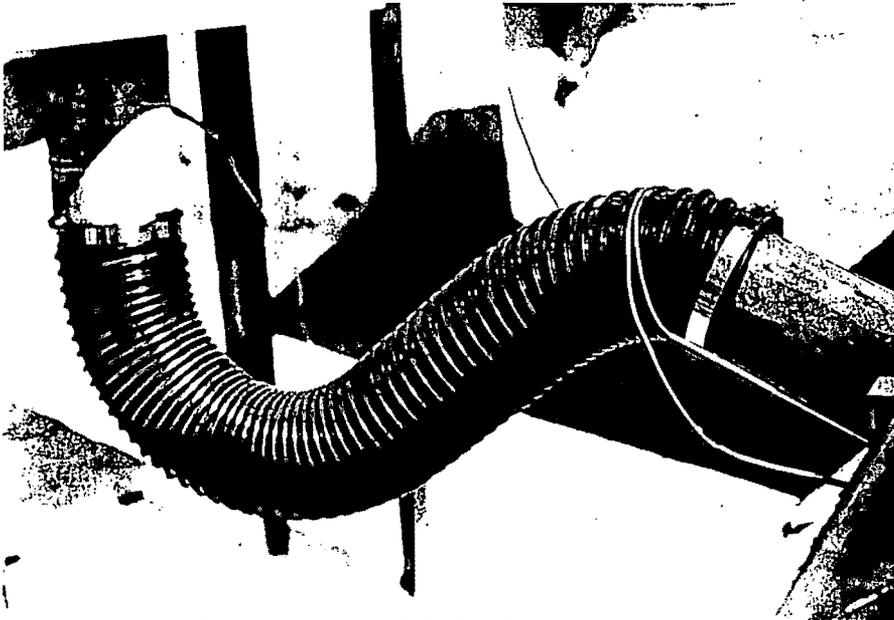
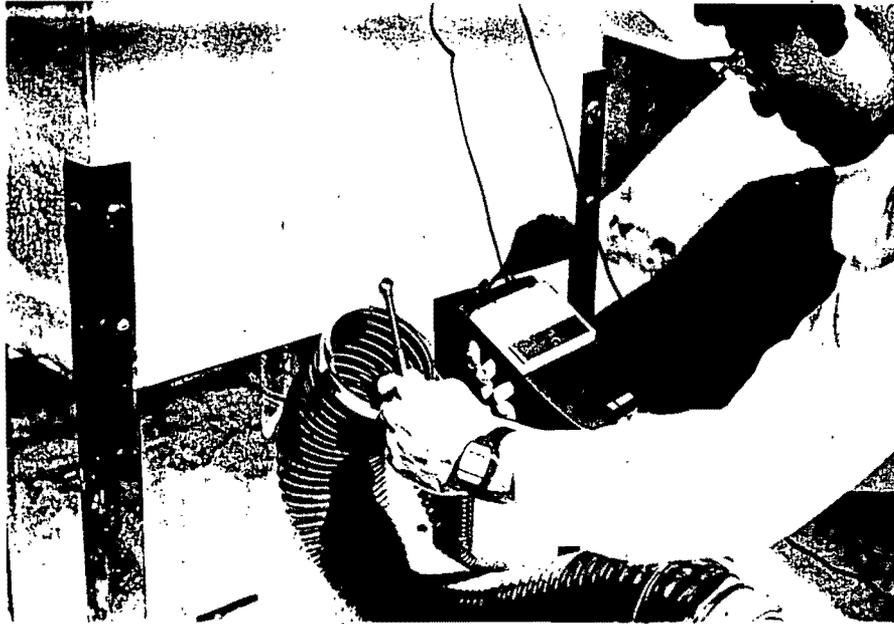


Fig. 13 Termistores utilizados para la determinación de la temperatura a la salida del colector, a la entrada del silo, a media altura del lecho de granos; y anemómetro utilizado en la medición de la velocidad del aire (ver fig. A5, pag. 112).

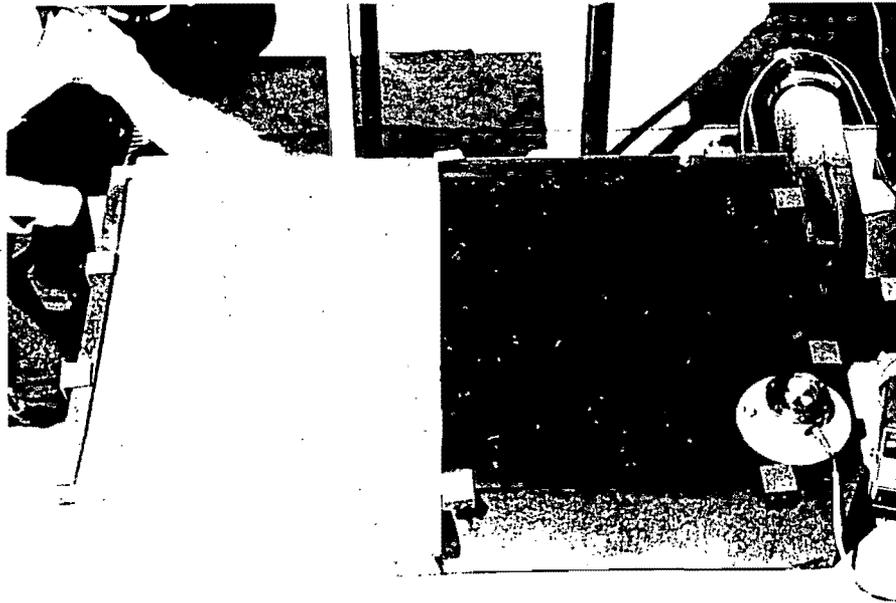


Fig.14 Colector utilizado durante los experimentos de secado solar de maíz.

En el segundo experimento se tapó la mitad de la cubierta del colector, con una capa de fibra de vidrio, para disminuir el ΔT del aire. En los experimentos tercero y cuarto se taparon las 3/4 partes de la cubierta.

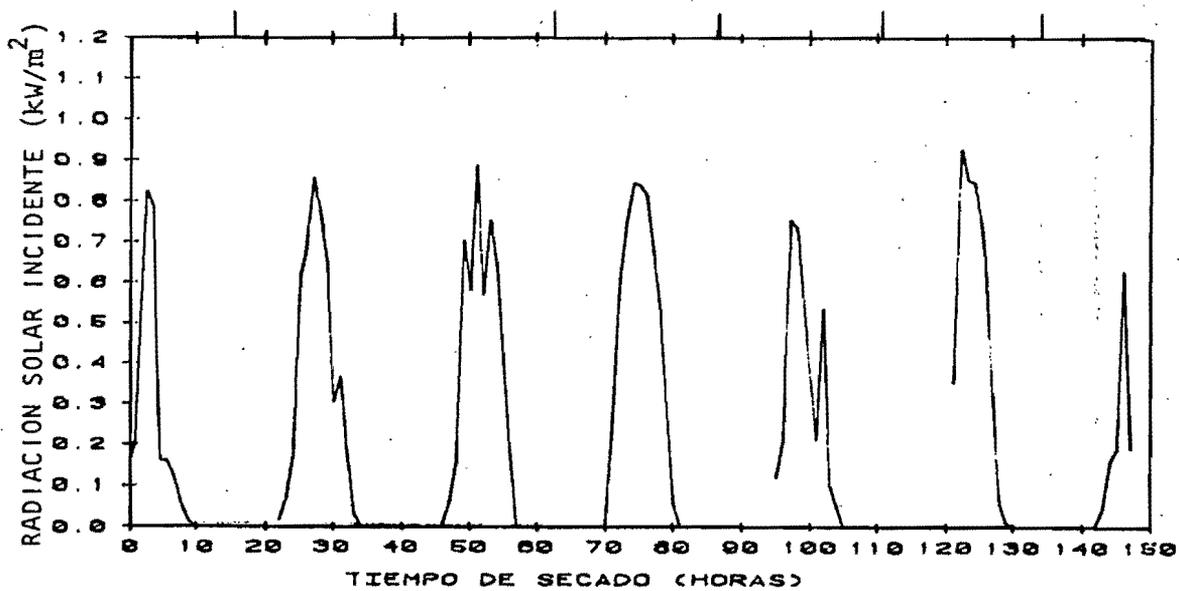


Fig. 15 Variación de la radiación solar incidente sobre el colector solar durante el periodo (28/X/86 - 4/XI/86) de duración del primer experimento, iniciado a las 9hrs. (tiempo local), $\beta=30^\circ$ y $\gamma = 0$

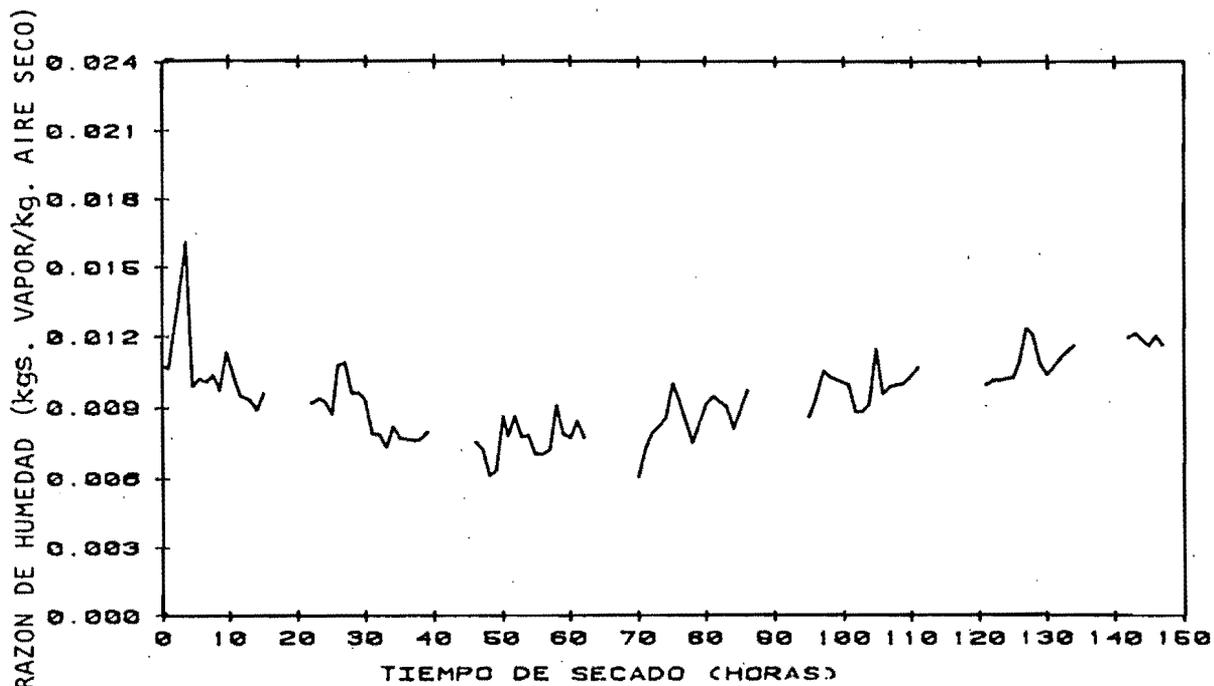


Fig. 16 Variación de la razón de humedad del ambiente durante el primer experimento. La curva está interrumpida porque en estos intervalos no se tomó la lectura correspondiente.

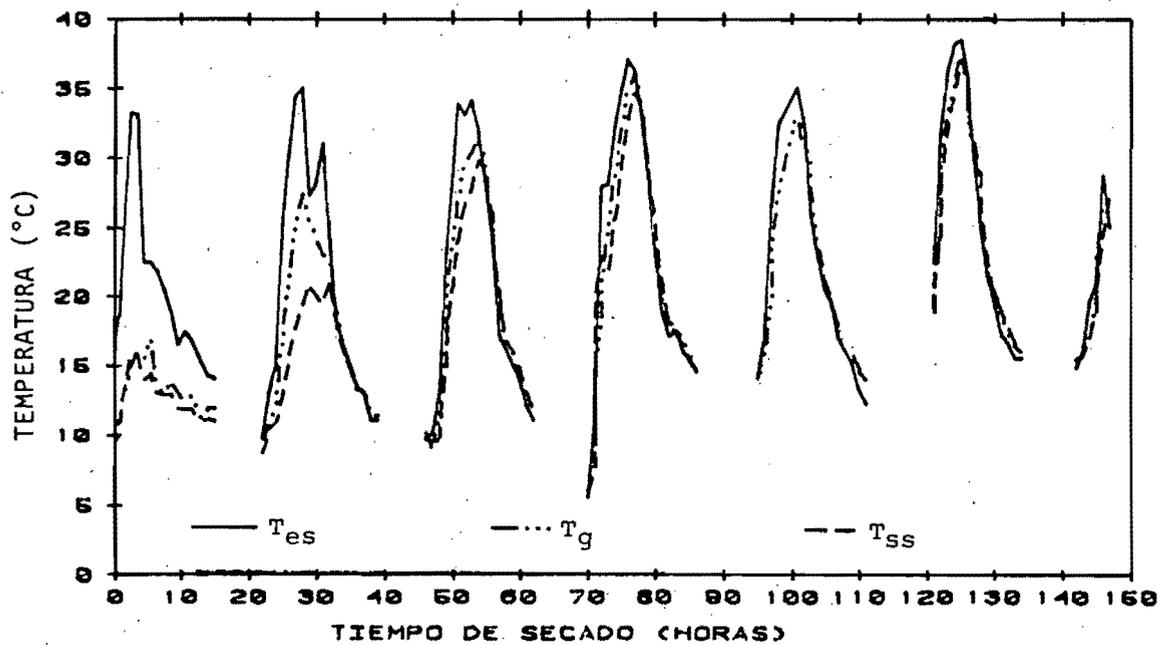


Fig. 17 Variación de la temperatura en el silo - durante el periodo (28/X/1986 - 4/X/1986) de duración del primer experimento, iniciado a las 9 horas (tiempo local).

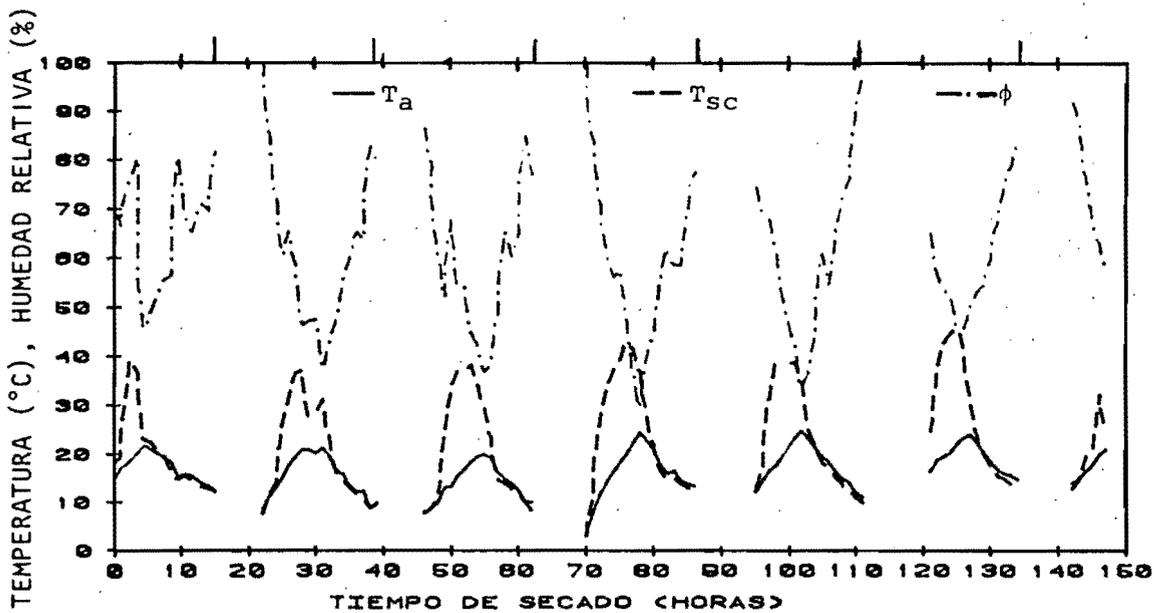


Fig. 18 Variación de la humedad relativa del aire ambiente y de su incremento de temperatura obtenido en el colector solar durante el primer experimento.

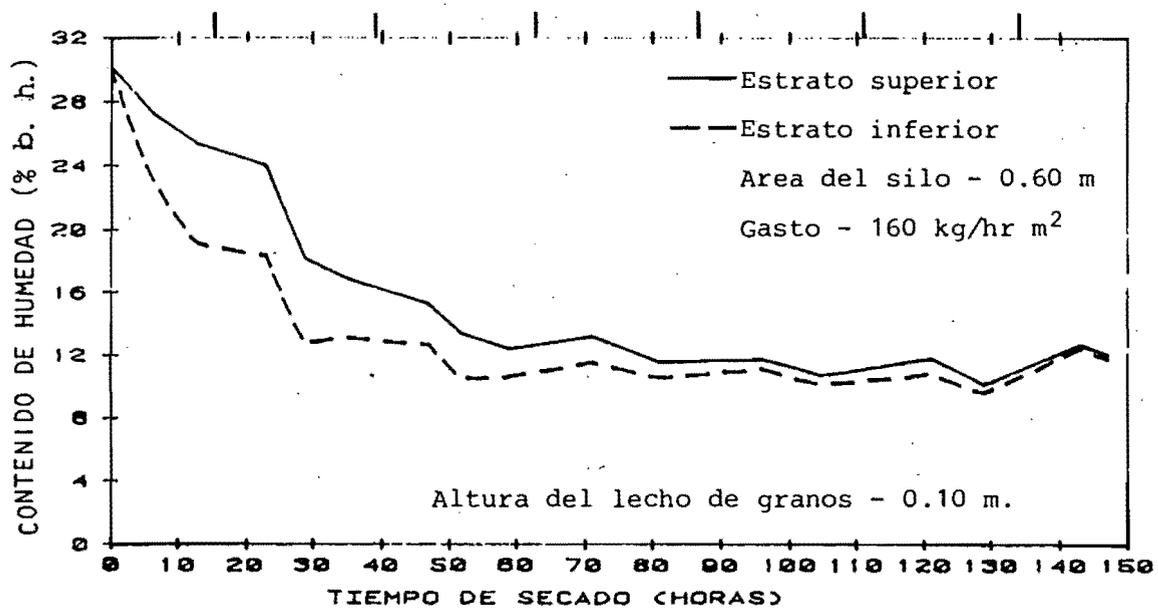


Fig. 19 Variación del contenido de humedad del maíz durante el periodo (28/X/86 - 4/XI/86) de duración del primer experimento, iniciado a las 9 hrs (tiempo local).

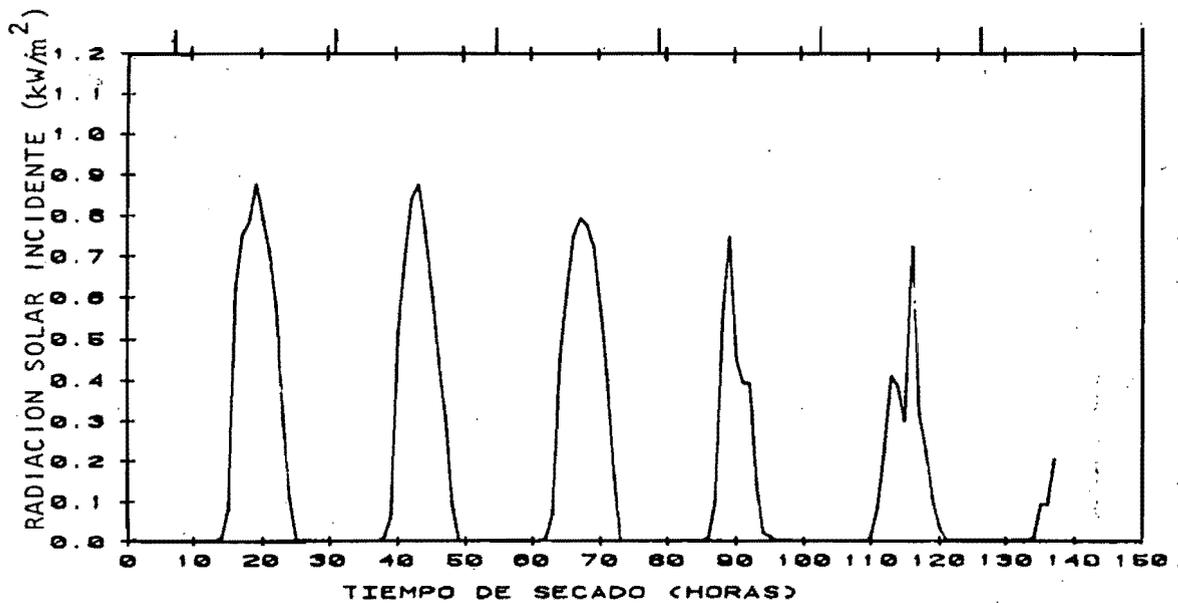


Fig. 20 Variación de la radiación solar incidente - sobre el colector solar durante el periodo (20/XI/1986-26/XI/1986) de duración del segundo experimento, iniciado a las 17 hrs. (tiempo local) $\beta=30^\circ$; $\gamma=0^\circ$

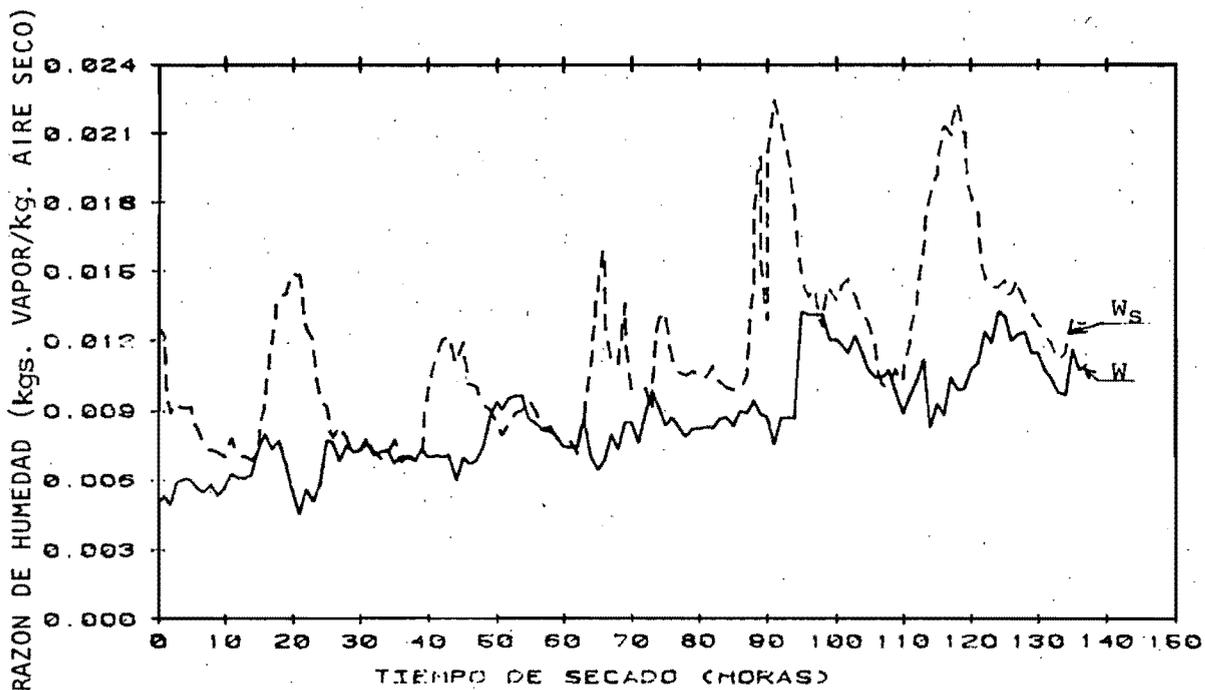


Fig. 21 Variación de la razón de humedad durante el periodo (20/XI/1986-26/XI/1986) de duración del segundo experimento, iniciado a las 17 hrs. (tiempo local)

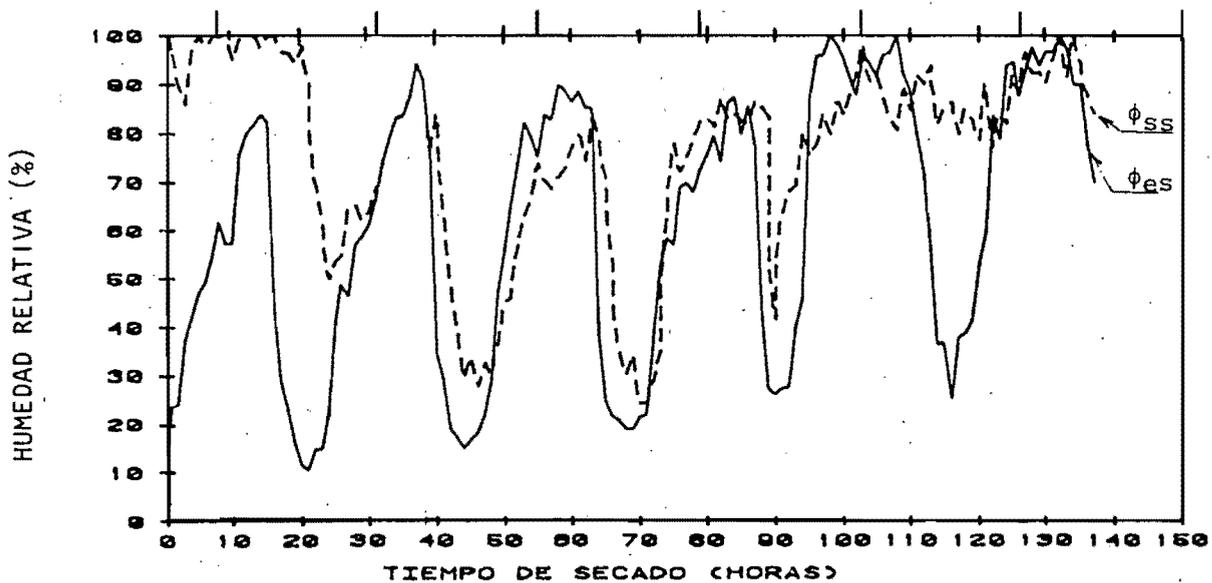


Fig. 22 Variación de humedad relativa en el silo durante el segundo experimento. Humedad inicial del grano = 45.73% b.s. (31.38% b.h.)

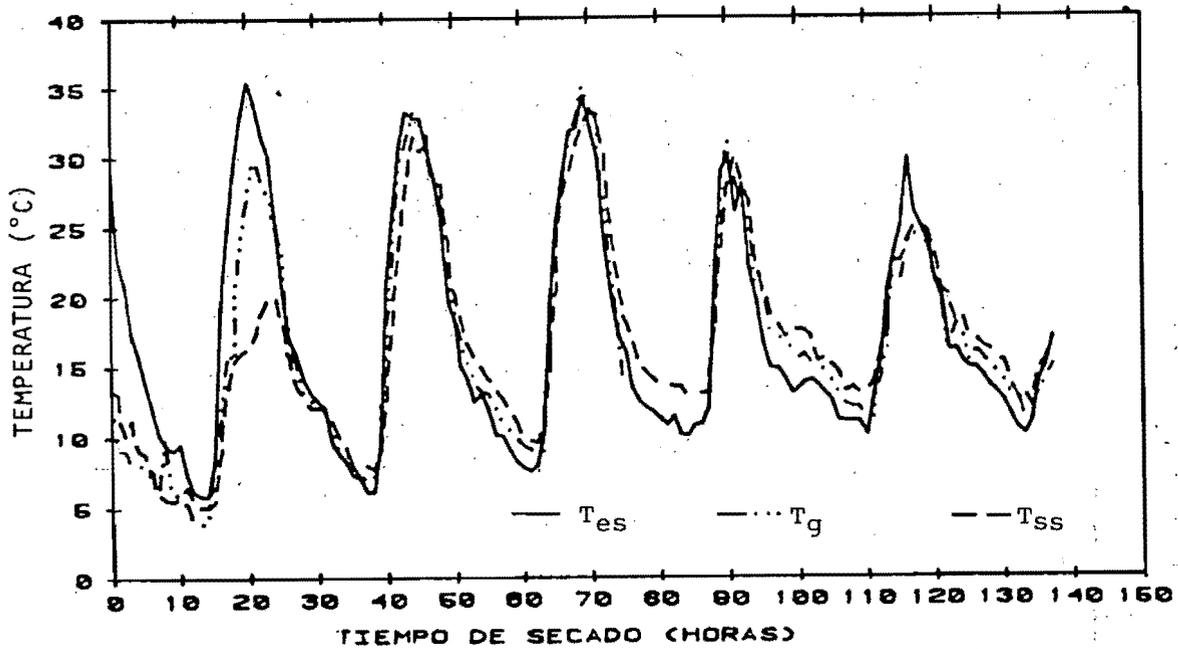


Fig. 23 Variación de la temperatura en el silo durante el periodo (20/XI/1986-26/XI/1986) de duración del segundo experimento iniciado a las 17 hrs (tiempo local)
 Altura del lecho de granos = 0.15 m.

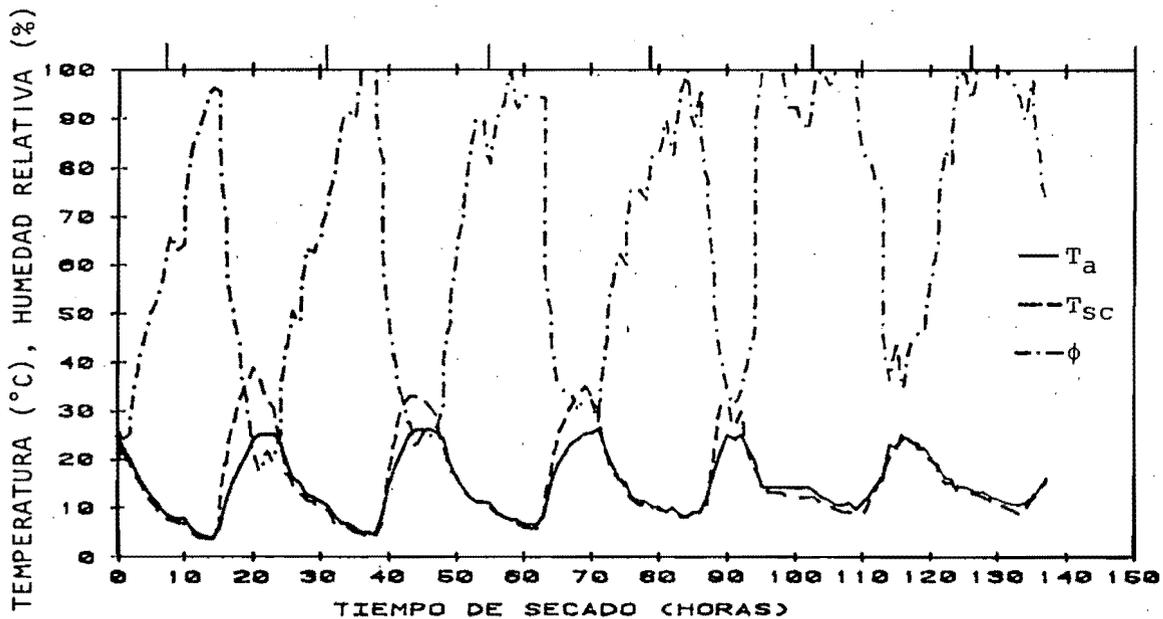


Fig. 24 Variación de la humedad relativa del aire ambiente y de su incremento de temperatura obtenido en el colector solar durante el segundo experimento.

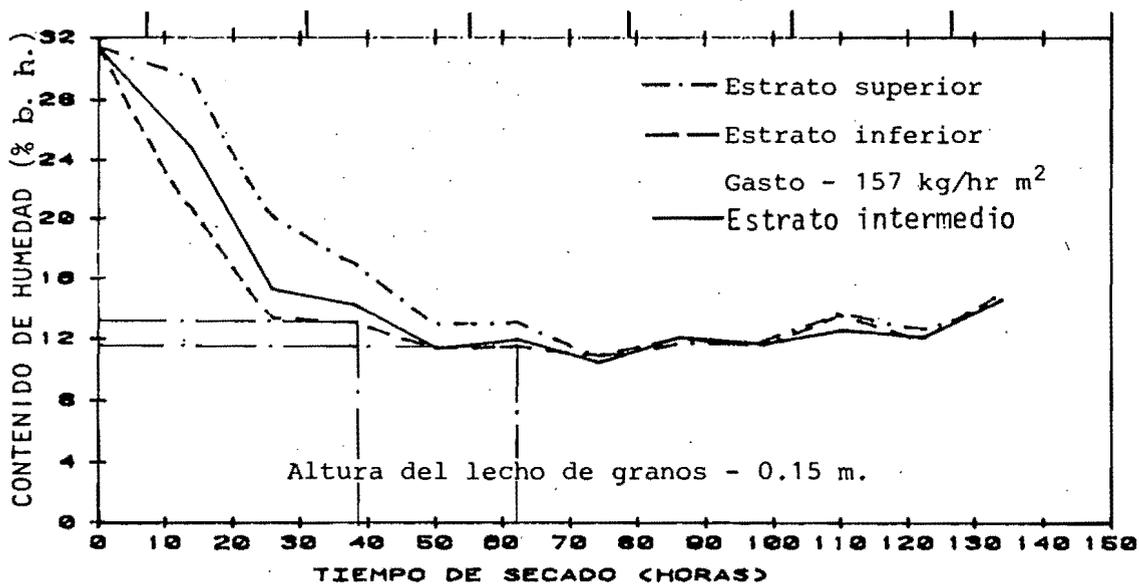


Fig. 25 Variación del contenido de humedad del maíz durante el periodo (20/XI/1986-26/XI/1986) de duración del segundo experimento, iniciado a las 17 hrs (tiempo local).

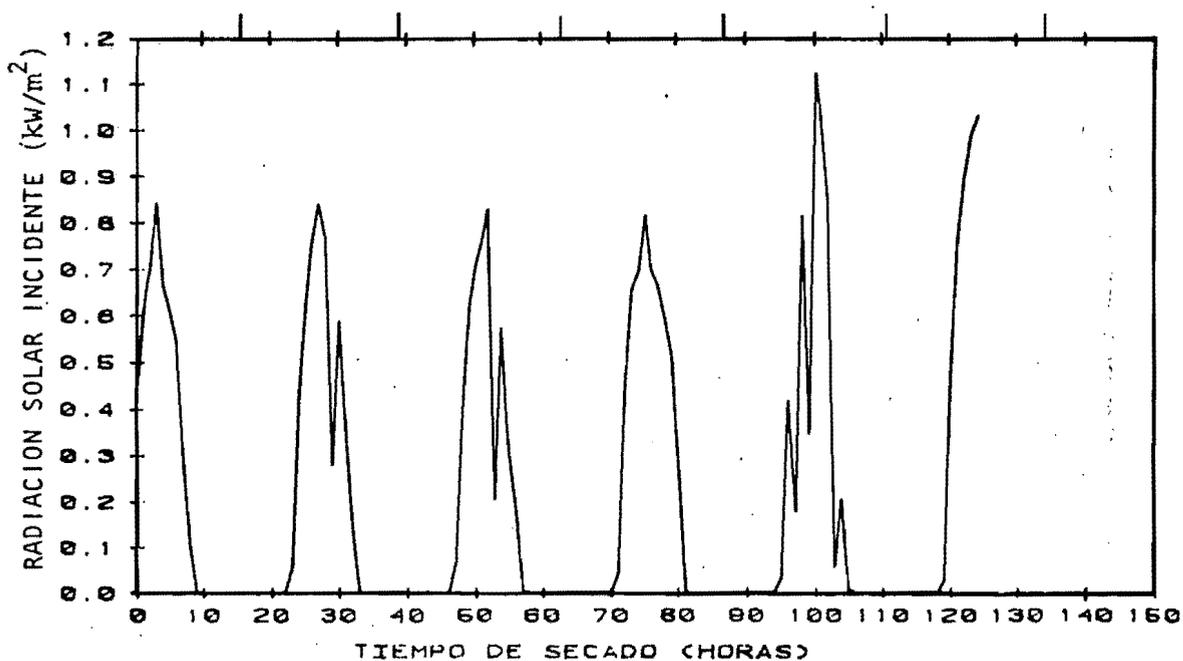


Fig. 26 Variación de la radiación solar incidente sobre el colector solar durante el periodo (5/XII/86 - 10/XII/86) de duración del tercer experimento, iniciado a las 9 hr (tiempo local), $\beta = 30$, $\gamma = 0$

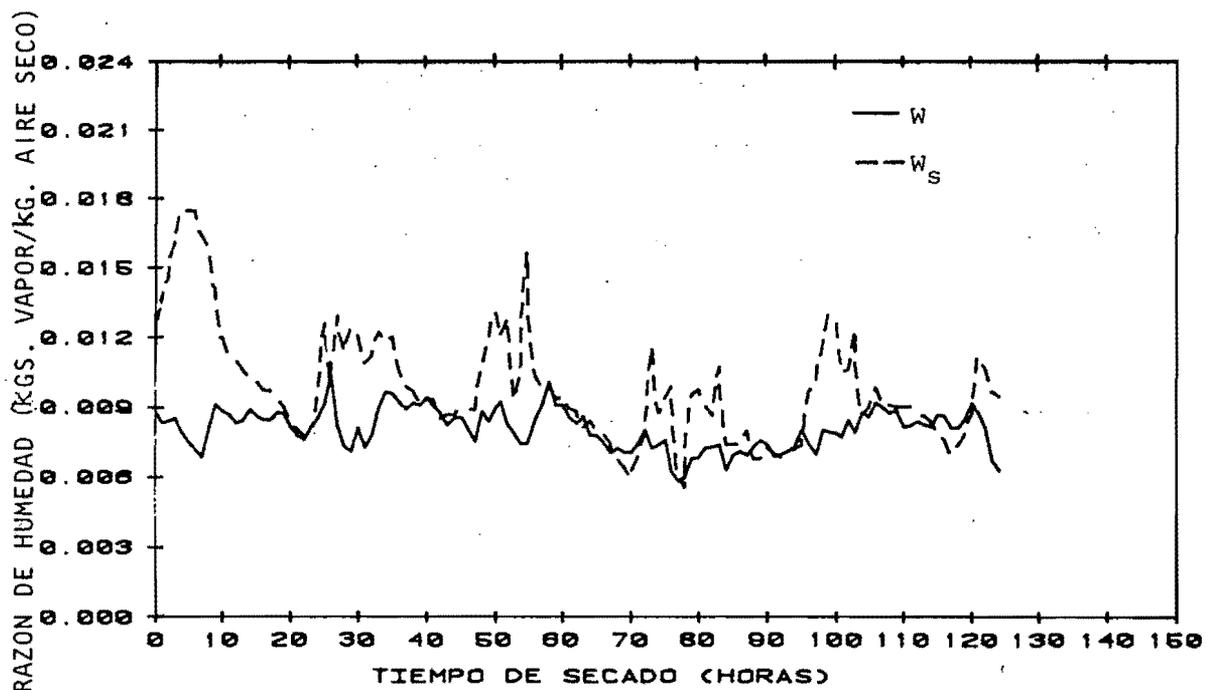


Fig.27 Variación de la razón de humedad durante el periodo (5/XII/86 - 10/XII/86) de duración del tercer experimento, iniciado a las 9 hrs (tiempo local).

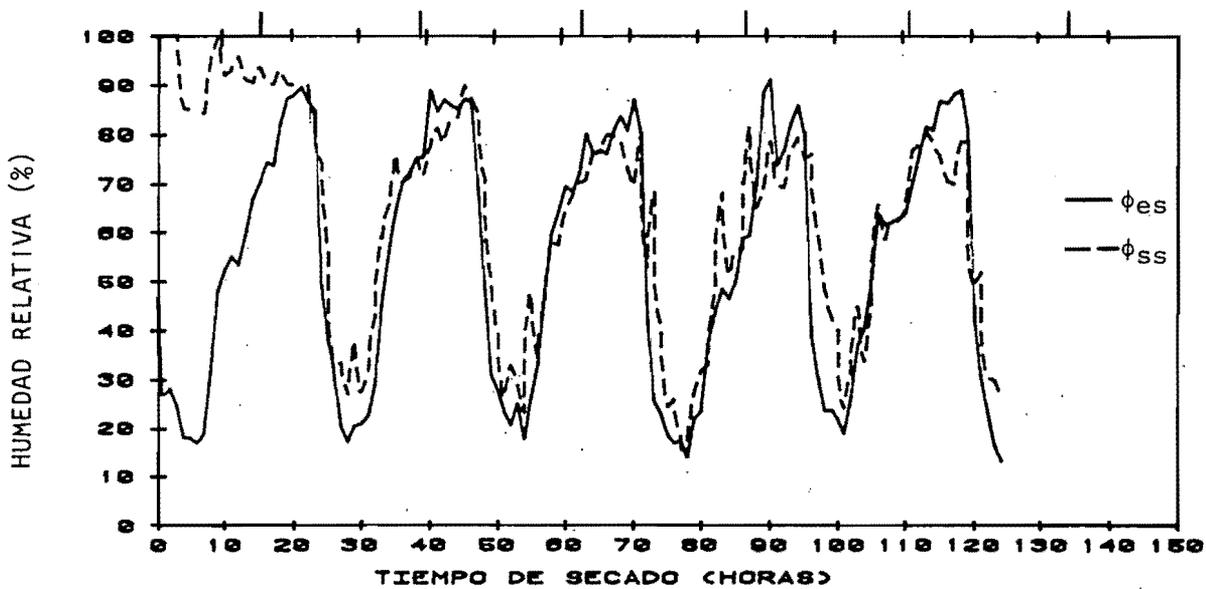


Fig.28 Variación de la humedad relativa del aire a la entrada y a la salida del silo durante el tercer experimento. Humedad inicial del grano - 25.38% b.s. (20.24% b.h.). Gasto - 83.67 kg/hr m²

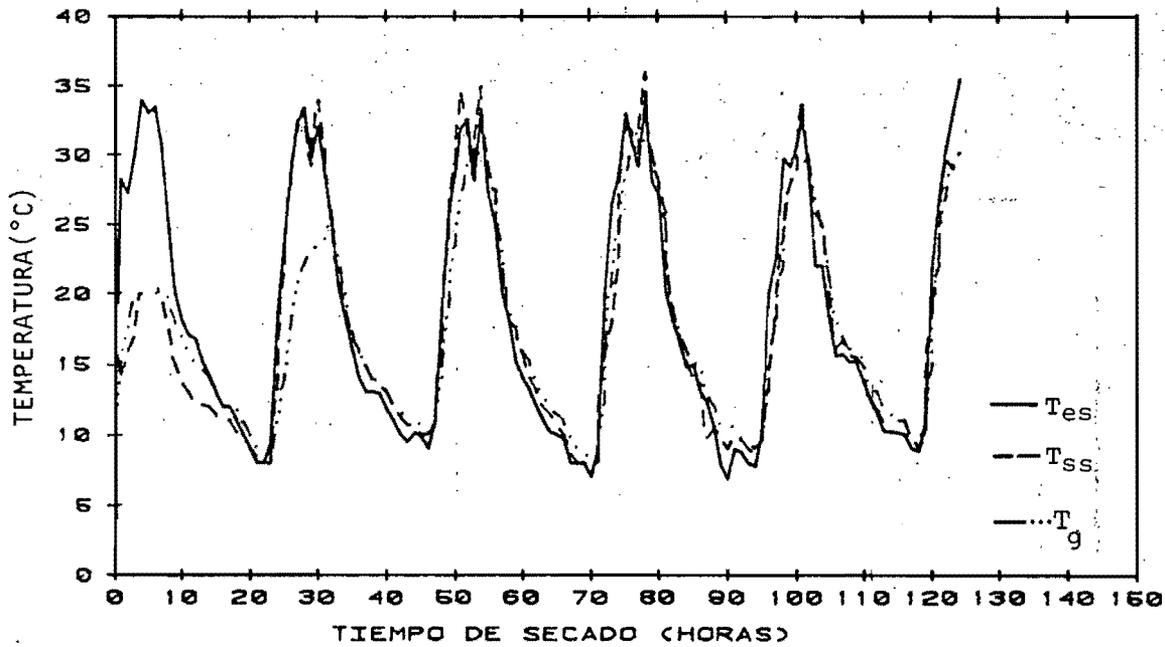


Fig. 29 Variación de la temperatura en el silo durante el periodo (5/XII/86 - 10/XII/86) de duración del tercer experimento, iniciado a las 9 hrs (tiempo local).

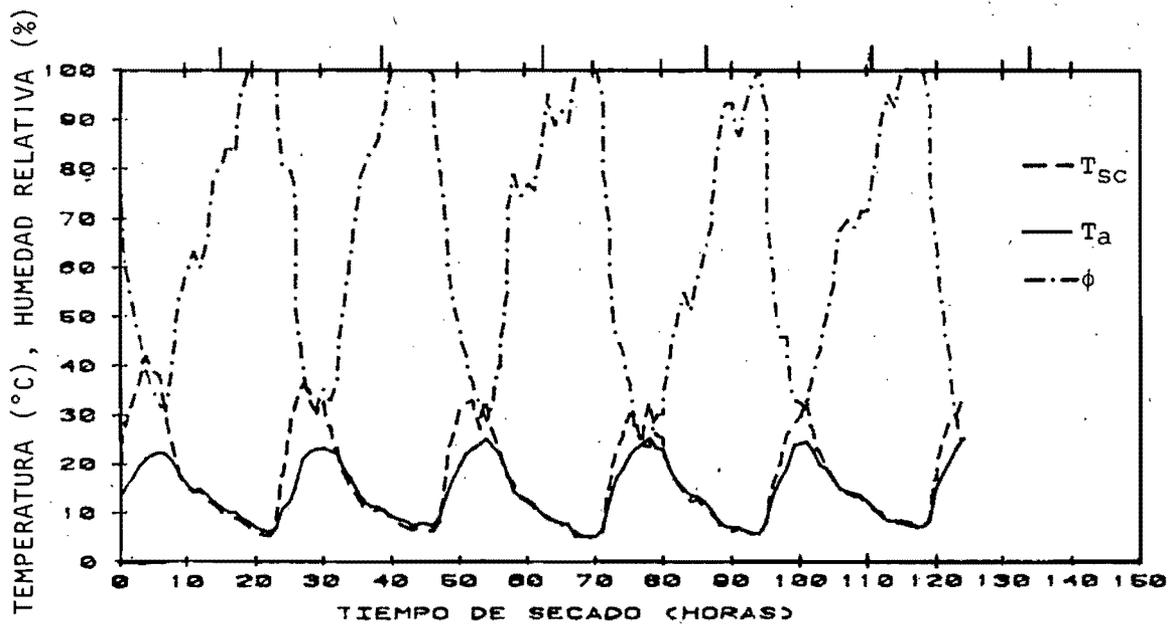


Fig. 30 Variación de la humedad relativa del aire ambiente y de su incremento de temperatura obtenido en el colector solar durante el tercer experimento.

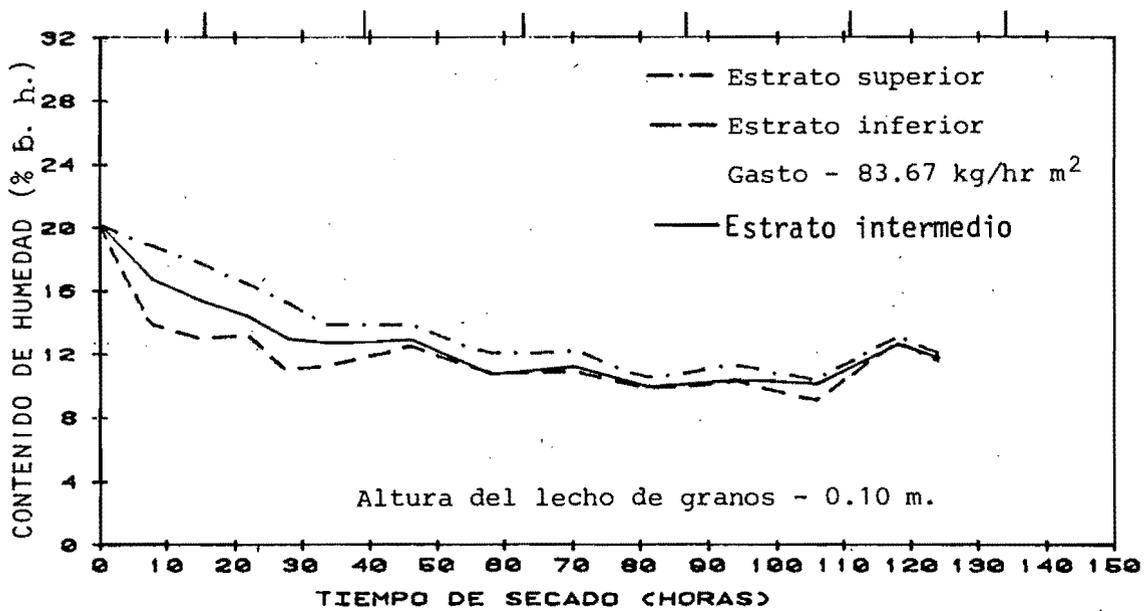


Fig. 31 Variación del contenido de humedad del maíz durante el periodo (5/XII/86 - 10/XII/86) de duración del tercer experimento, iniciado a las 9 hrs (tiempo local).

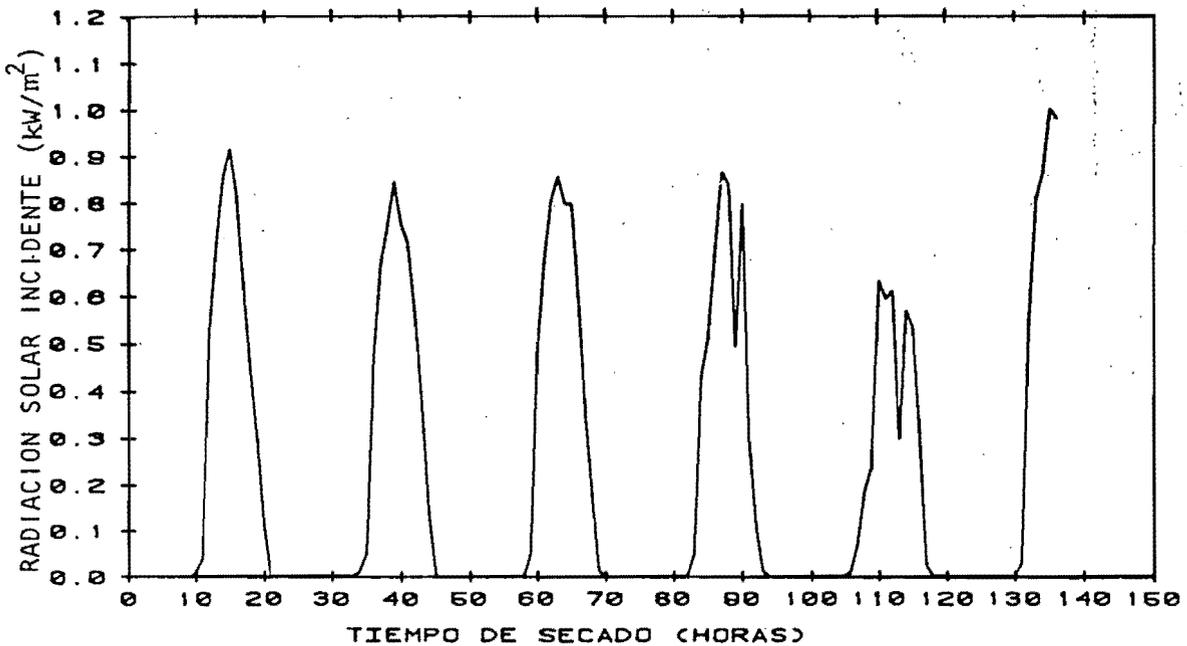


Fig. 32 Variación de la radiación solar incidente sobre el colector durante el periodo (15/XII/86 - 22/XII/86) de duración del cuarto experimento, iniciado a las 21 hrs (tiempo local).

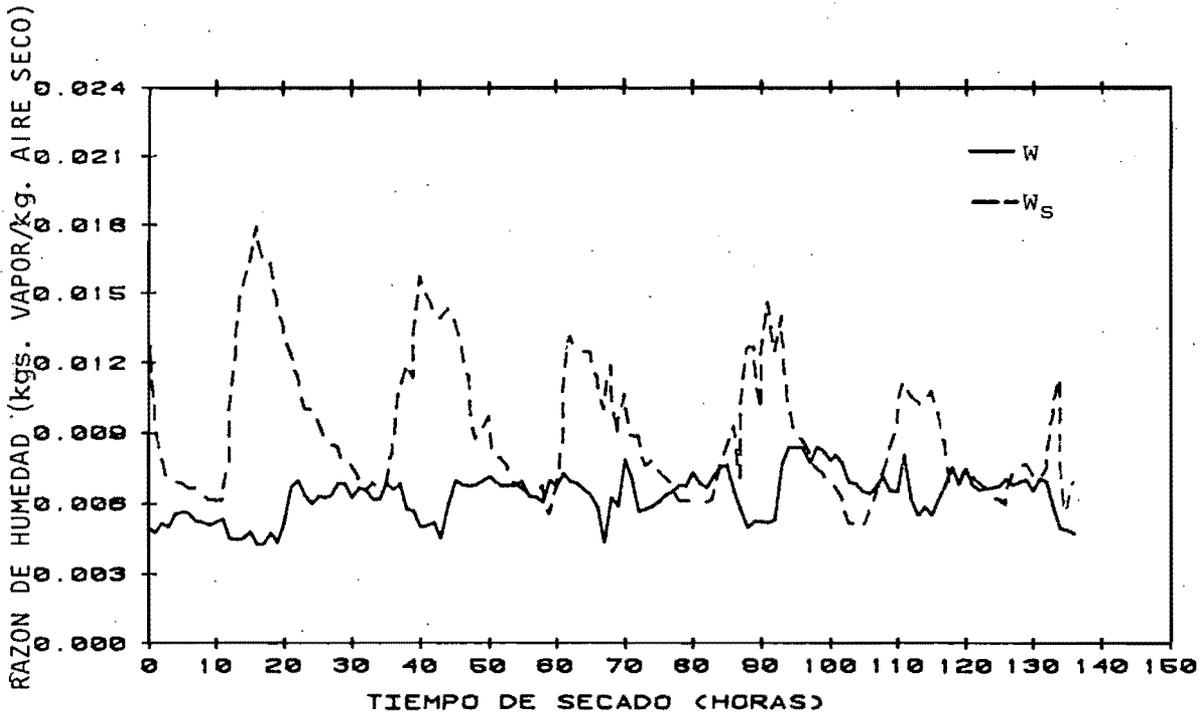


Fig.33 Variación de la razón de humedad durante el periodo (16/XII/86 - 22/XII/86) de duración del cuarto experimento, iniciado a las 21 hrs (tiempo local).

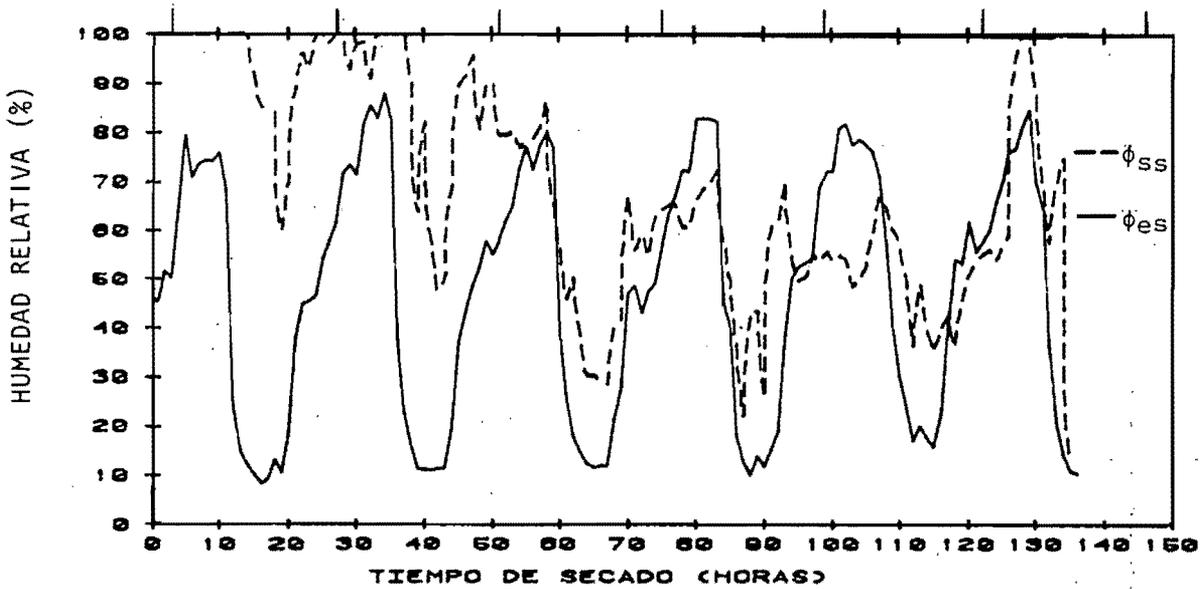


Fig. 34 Variación de la humedad relativa en el silo durante el cuarto experimento.
 Humedad inicial del grano - 26.82% b.s. (21.15 b.h.)
 Gasto - 212.3 kg/hr m².

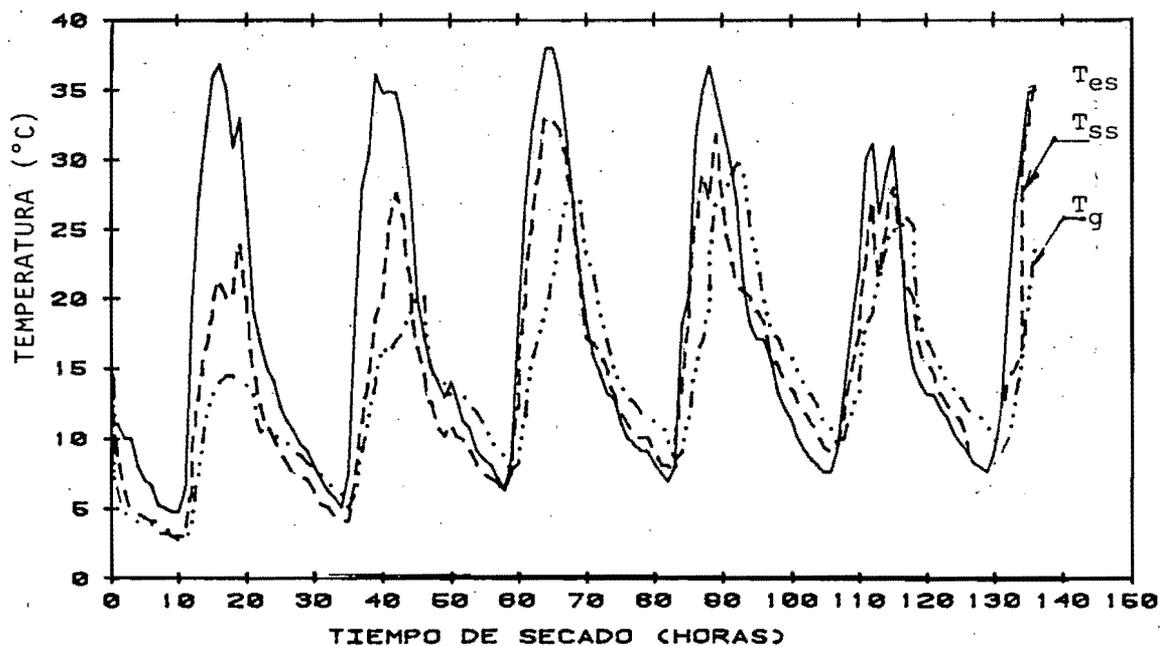


Fig. 35 Variación de la temperatura en el silo durante el periodo (16/XII/86 - 22/XII/86) de duración del cuarto experimento, iniciado a las 21 hrs (tiempo local).

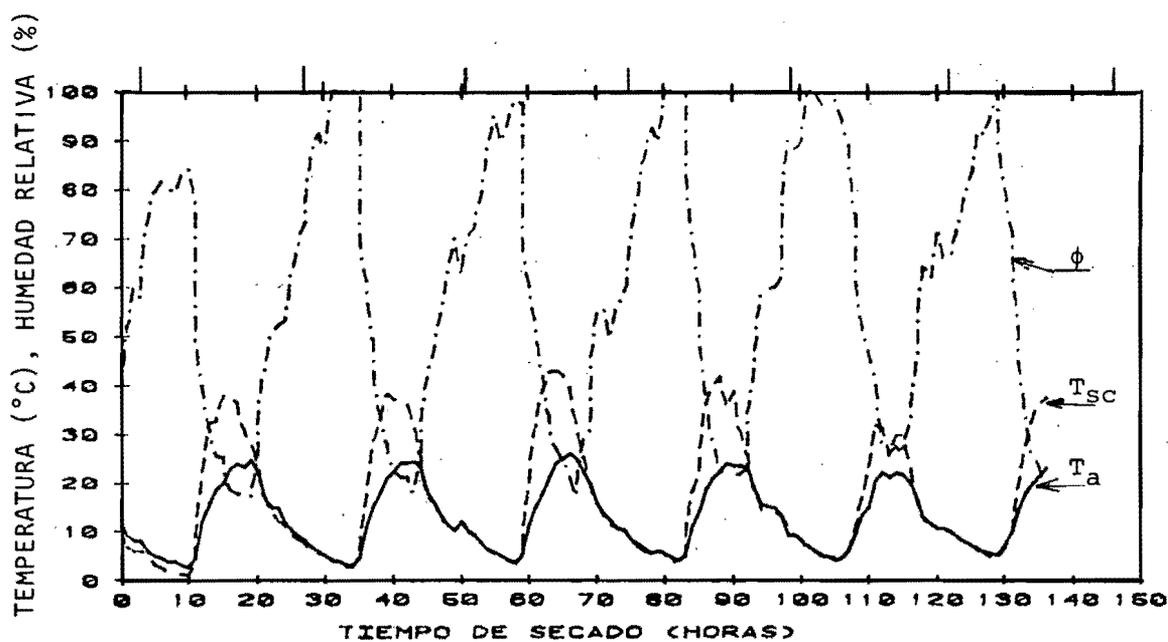


Fig. 36 Variación de la humedad relativa del aire ambiente y de su incremento de temperatura obtenido en el colector solar durante el cuarto experimento.

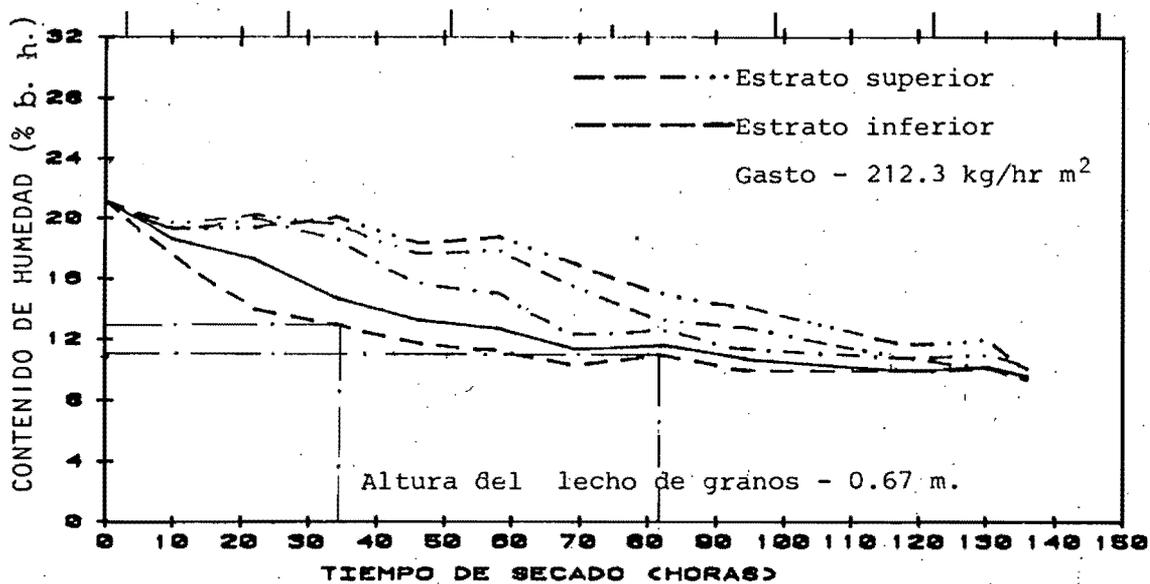


Fig. 37 Variación del contenido de humedad del maíz durante el periodo (16/XII/86 - 22/XII/86) de duración del cuarto experimento, iniciado a las 21 hrs (tiempo local).

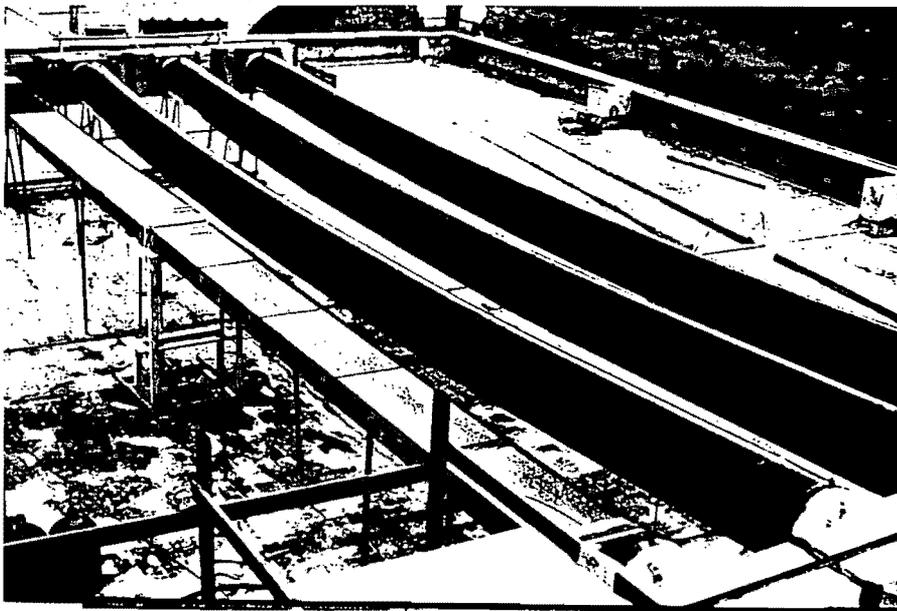


Fig.38 Primer prototipo de calentador solar de aire tipo inflable, con 11 m de longitud y 0.45 m de diámetro. En la parte izquierda de la fotografía inferior puede verse un captador plano de caja metálica y vidrio. Los cuatro captadores operaron en paralelo (fuente: ref. 8).

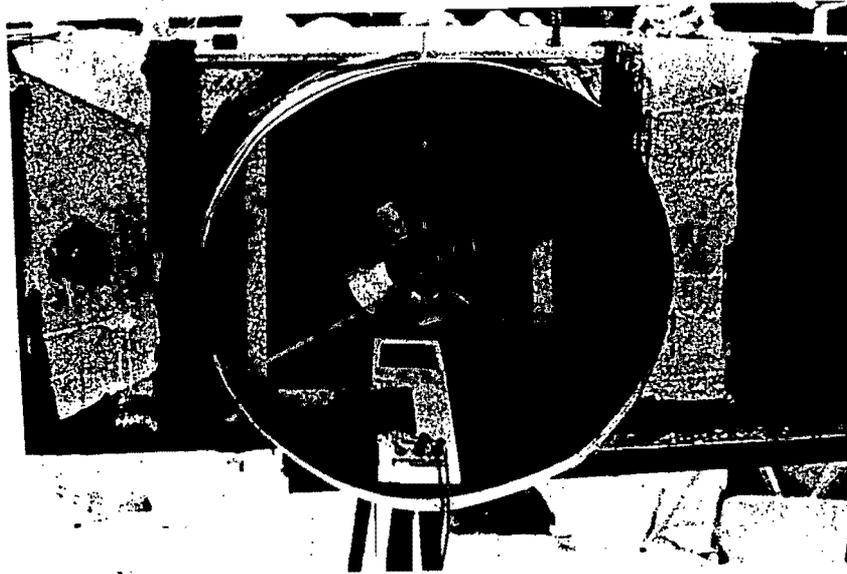


Fig. 39 Anemómetro tipo aerogenerador instalado en el centro de una de las tomas del cabezal de salida del aire.

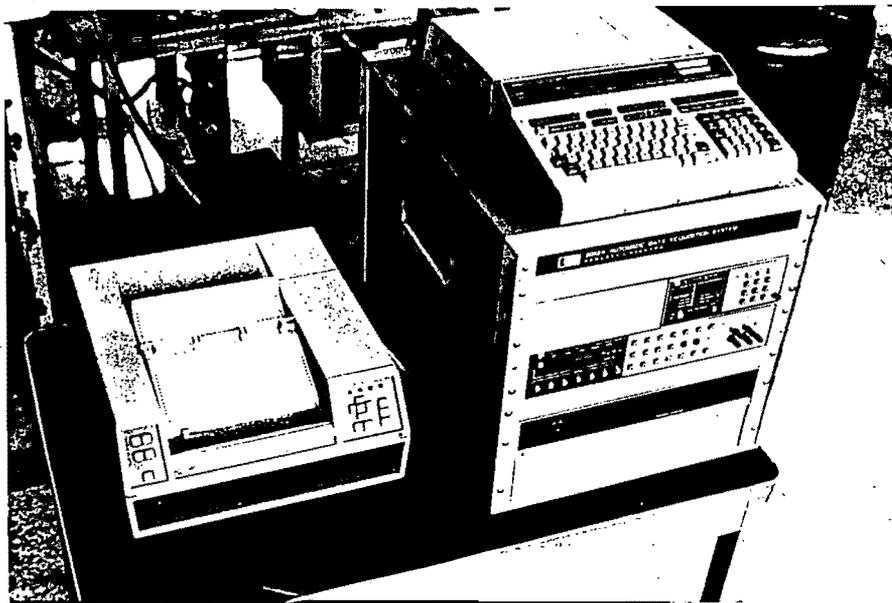


Fig. 40 Sistema automático de registro y procesamiento de datos; computadora y multímetro digital (lado derecho), impresora-graficadora (lado izquierdo).
Fuente: ref. 8.

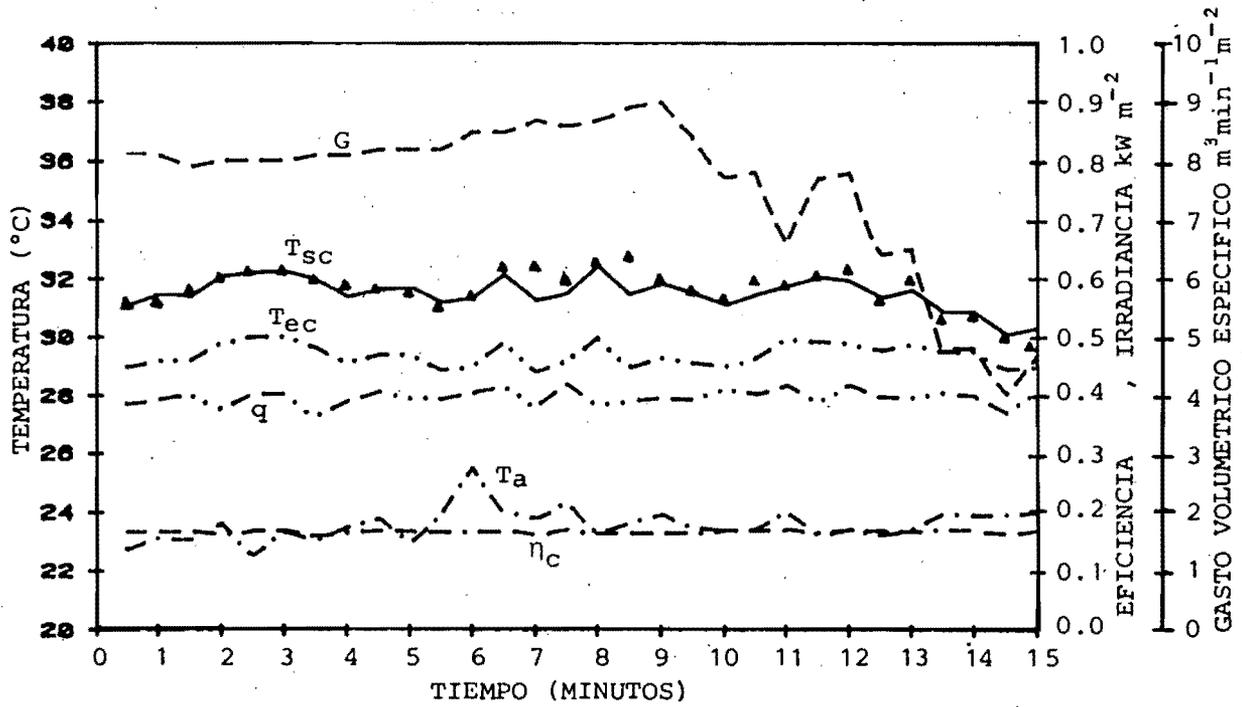


Fig 41 Correlación teórico-experimental del colector cilíndrico de plástico y variaciones de temperatura ambiente (T_a), temperatura del aire a la entrada del colector (T_{ec}), temperatura del aire a la salida del colector (T_{sc}), irradiancia sobre el colector (G), gasto volumétrico específico (q) y eficiencia del colector (η_c).

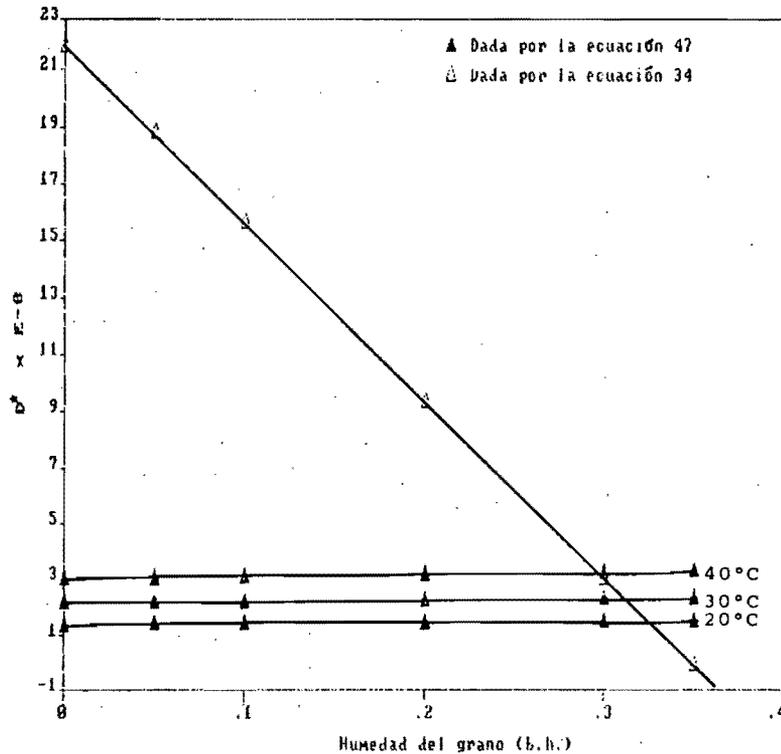


Fig 42 Variación de D^* con respecto a la humedad del grano.

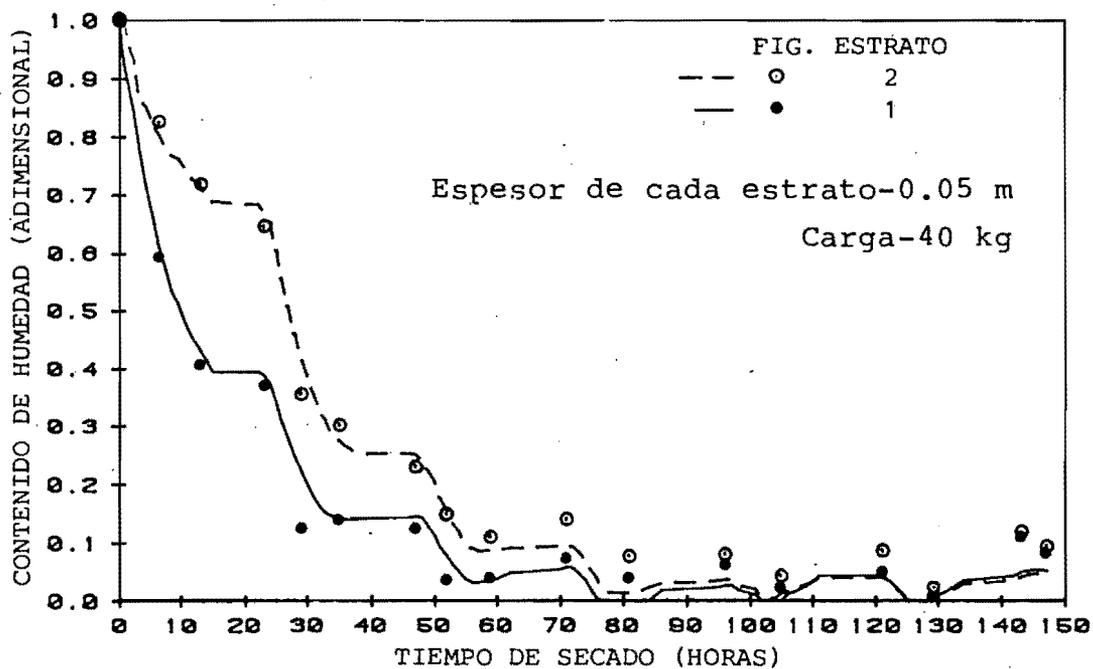


Fig 43 Correlación teórico-experimental del primer experimento. El error promedio de la correlación del primer estrato, con respecto a la humedad del grano en b.s., fue de $\pm 6.27\%$ y el del segundo de $\pm 6.73\%$. El contenido de humedad adimensional 1 corresponde a 43.2% b.s. y el 0 a 10.6% b.s.

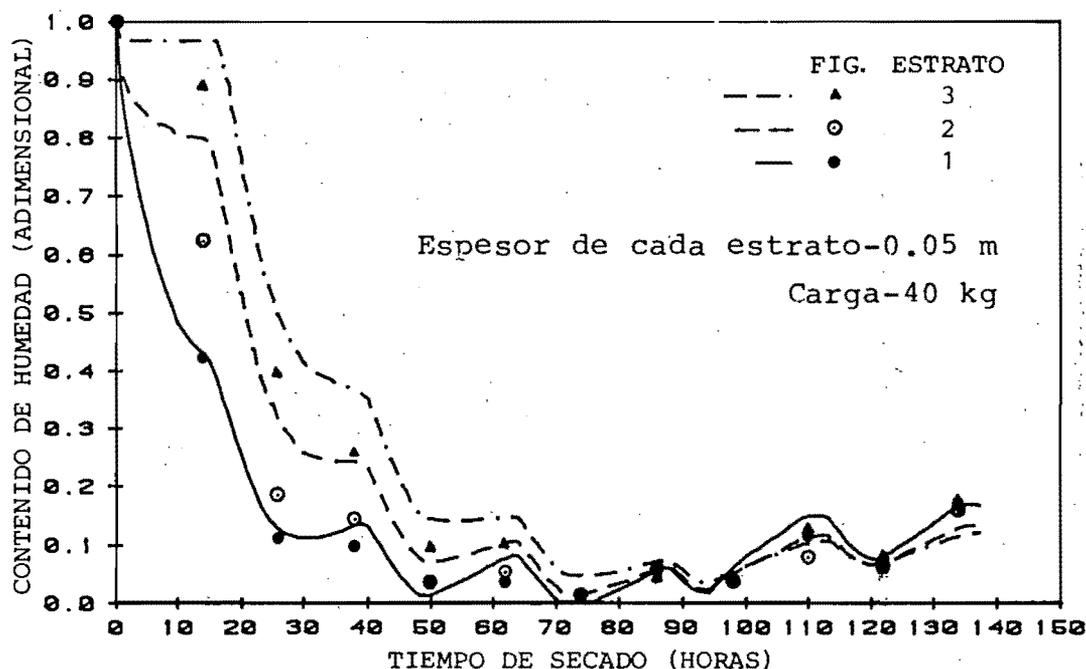


Fig 44 Correlación teórico-experimental del segundo experimento. El error promedio de la correlación, con respecto a la humedad del grano en b.s., del primero, segundo y tercer estrato fue de $\pm 4.65\%$, $\pm 6.5\%$ y $\pm 7.15\%$ respectivamente. El contenido de humedad adimensional 1 corresponde a 45.7% b.s. y el 0 a 11.7%.



DEPFI

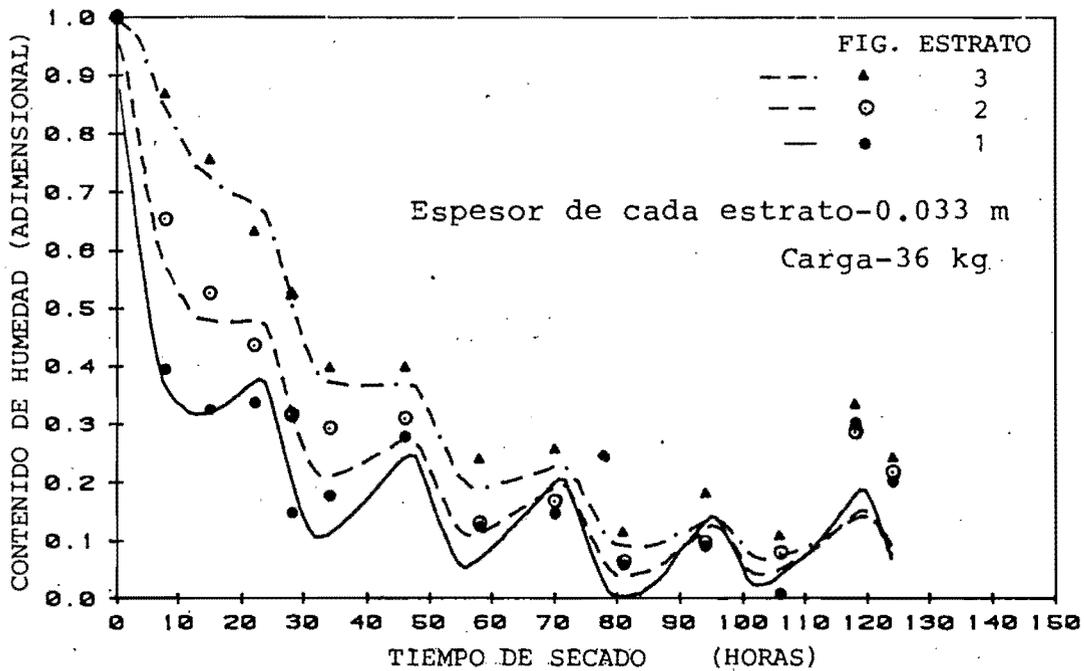


Fig. 45 Correlación teórico-experimental del tercer experimento. El error promedio de la correlación, con respecto a la humedad del grano en b.s., del primero, segundo y tercer estrato fue de $\pm 4.34\%$, $\pm 3.32\%$ y $\pm 2.76\%$ respectivamente. El contenido de humedad adimensional 1 corresponde a 25.4% b.s. y el 0 a 10.1% b.s.

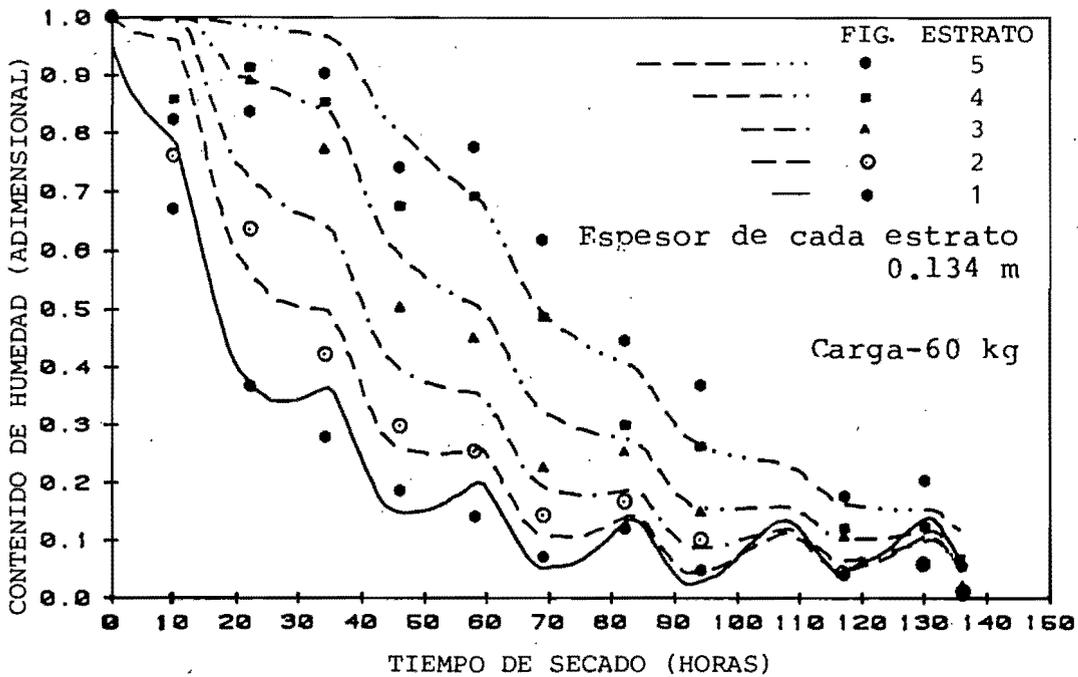
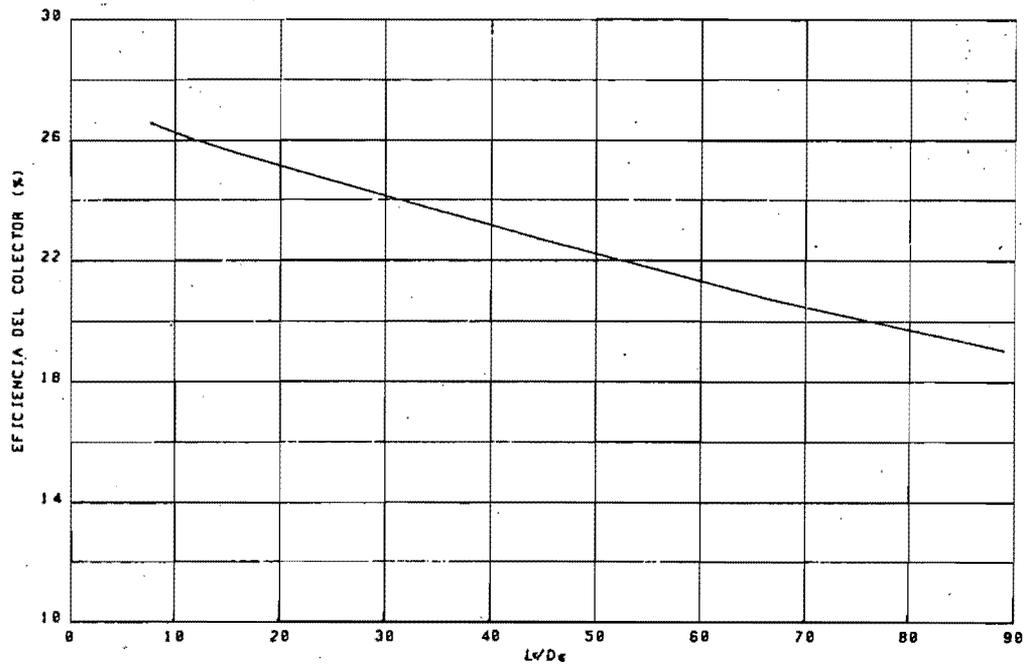


Fig 46 Correlación teórico experimental del cuarto experimento. El error promedio, con respecto a la humedad del grano en b.s., del primero, segundo, tercero, cuarto y quinto estrato fue de $\pm 4.84\%$, $\pm 4.66\%$, $\pm 6.9\%$, $\pm 5.35\%$ y $\pm 6.3\%$ respectivamente, resultando un error promedio total de 5.62% . El contenido de humedad adimensional 1 corresponde a 26.8% b.s. y el 0 a 10.4% b.s.



Variación de la eficiencia del colector con respecto a L_c/D_c

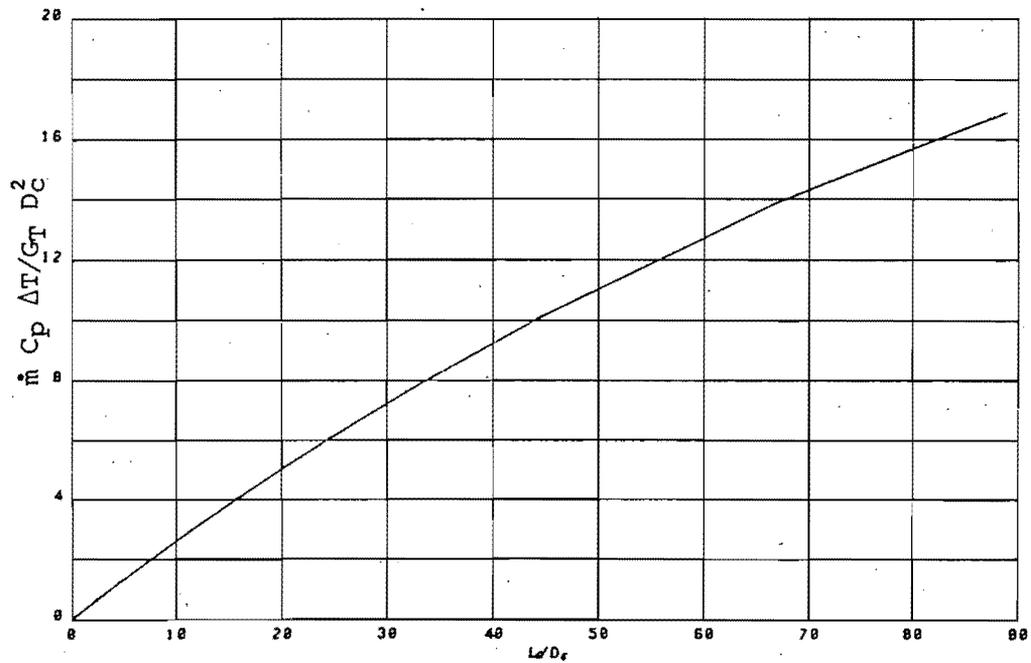


Fig 47 Variación de $\dot{m} C_p \Delta T / G_T D_c^2$ con respecto a L_c/D_c

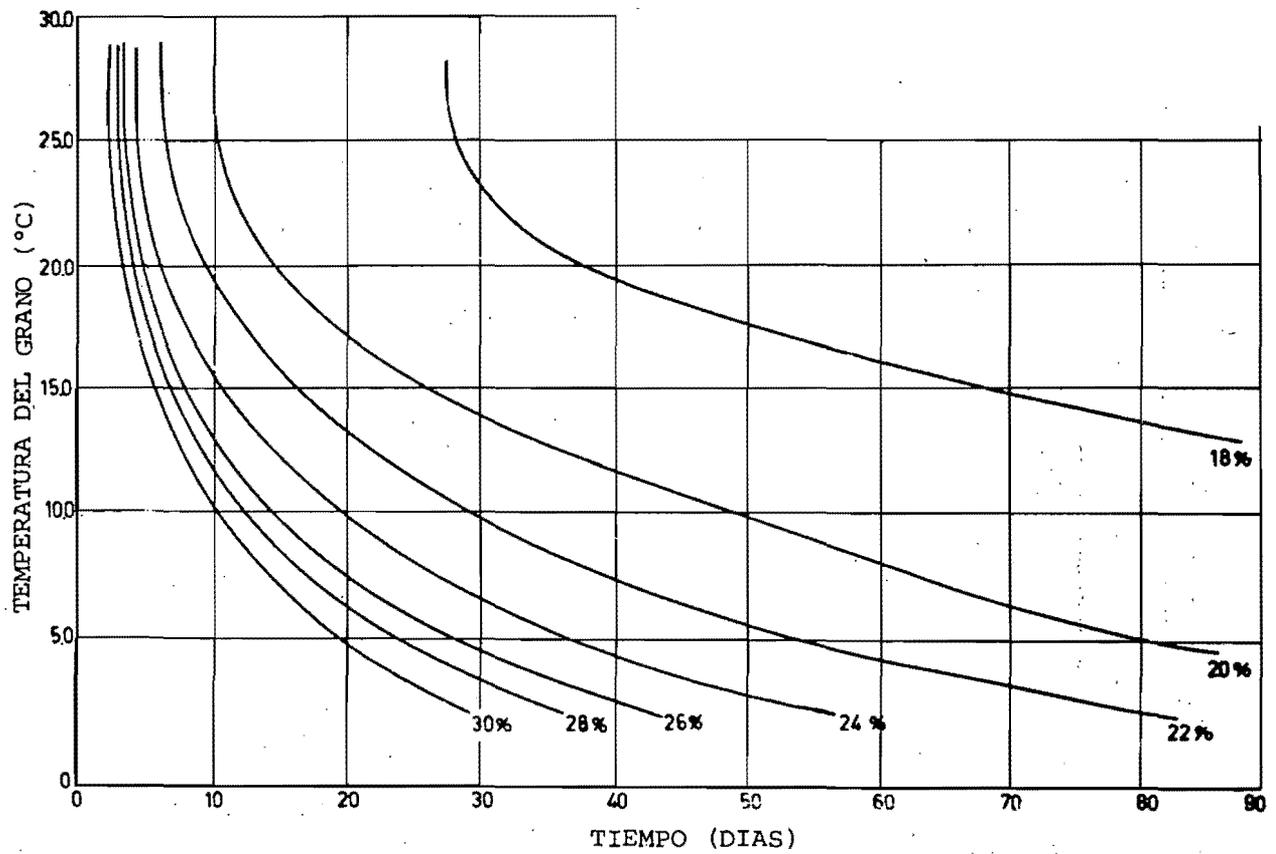


Fig 48 Tiempo de almacenamiento seguro para maíz con varios contenidos de humedad b.h. (fuente: ref. 39).

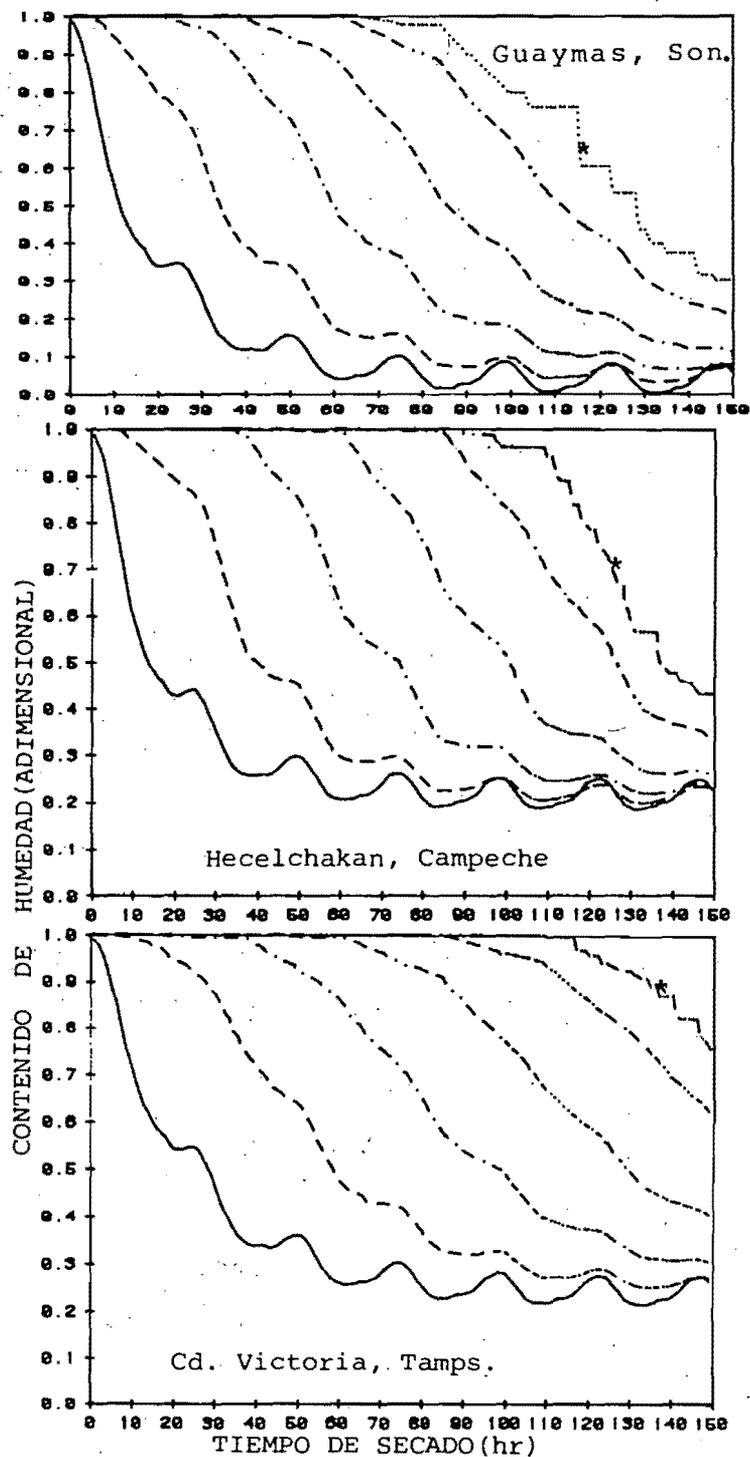


Fig 49 Resultados de la simulación del secado solar de maíz. La última curva representa la variación del contenido de humedad del cm de granos que se encuentra en la cima del lecho. Las humedades inicial y final para correr el programa de simulación fueron 28.2% b.s. y 10.0% b.h. (La curva con asterisco es la última).

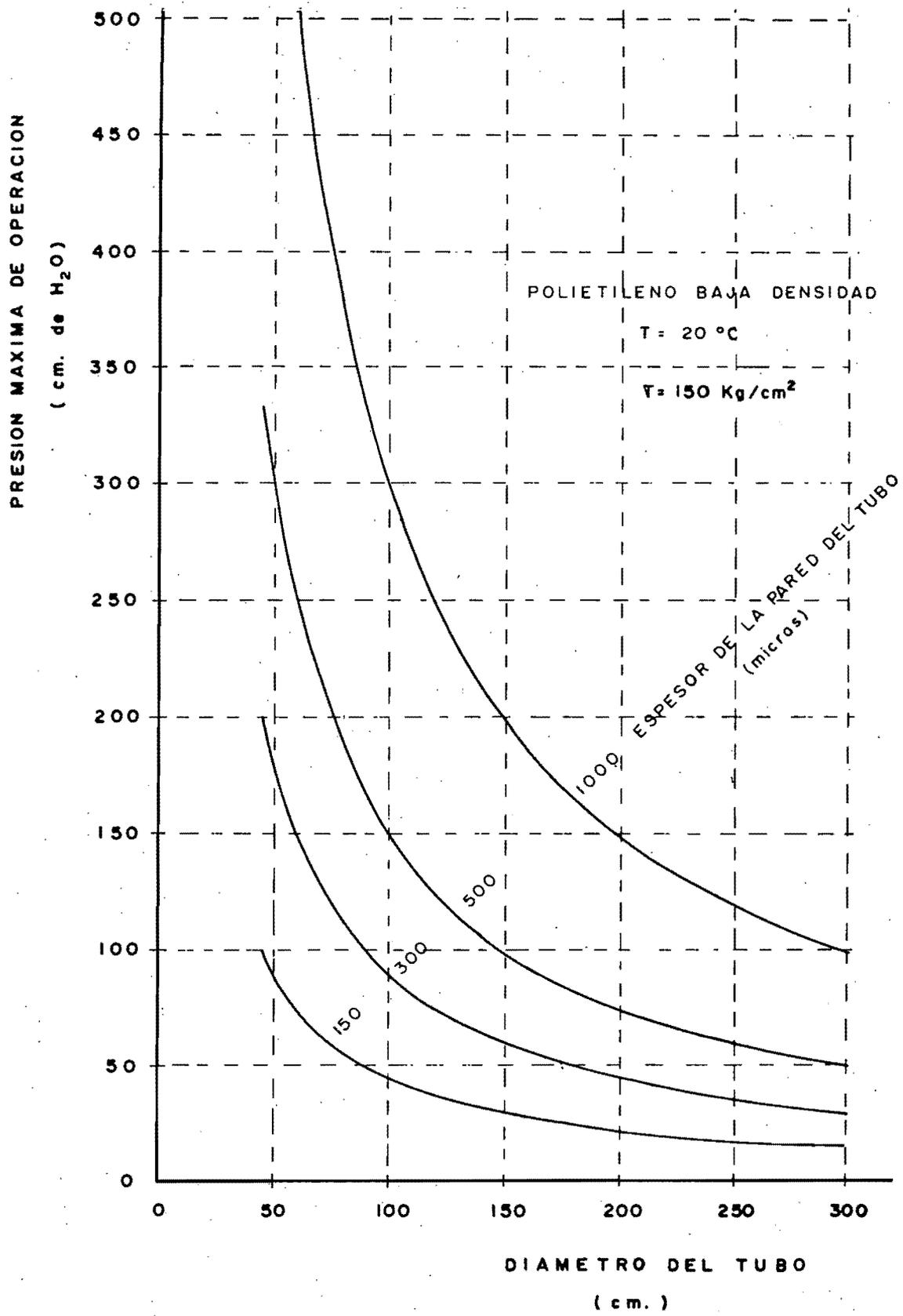


Fig 50 Presión máxima de operación de un ducto de polietileno de baja densidad, en función del diámetro.
 Fuente: ref. 8.

REFERENCIAS

1. Moreno, Ciencia y Desarrollo, CONACyT, sep-oct. No. 58, México, (1984).
2. Anuario Estadístico, S.P.P., México, (1985).
- 2' Javier Rodríguez Gómez, La Jornada, 22 de septiembre, p. 17, México, (1987).
3. Manejo y conservación de granos y semillas, PUAL, UNAM, (1980).
4. Bauer Mariano, García C. Leopoldo, Moshinsky Marcos, Planeación Energética en México, Mito o Realidad, El Colegio Nacional, PUE/UNAM, (1982).
5. Foster George H. and Peart Robert M., Solar grain drying, progress and potential, Agriculture Information Bulletin No. 401, pp 1-14 (1976).
6. Chau K. V., Baird C. D., Bagnall C. O., Performance of a Plastic Suspended Screen Solar Air Heater, J. Agric. Engng. Res. 25, 231-238 (1980).
7. Bansal N. K., and Uhlemann R., Development and testing of low cost solar energy collectors for heating air, Solar Energy, Vol. 33 No. 2, pp 197-202 (1984).
8. Gutiérrez F., Tovar R. Desarrollo de un banco de calentadores solares para aire aplicables al secado agrícola (informe final elaborado para CONACyT, I.I. UNAM (1986).
9. Hall Carl W., Drying and storage of agricultural crops, AVI PUBLISHING COMPANY, ING. USA, pp. 1 - 10 (1984).
10. Van Arsdel Wallance B., Copley Michael J., and Morgan Arthur I., Food dehydration AVI PUBLISHING COMPANY, INC. Second Edition, Volume 1 USA, pp. 1 - 15 (1973).

11. Lawand T. A., Posibilidades de utilizacion de secados agrícolas solares en las zonas de desarrollo, Brace Research Institute, Macdonald College de la Universidad McGill, Quebec, Canadá, pp 135-143.
12. Inglett E. George, Maize Recont Progress in Chemistry and Technology, Academic Press, France (1982).
13. Pierce R. O., Thompson T. L., Solar Grain Drying in the North Central Region - Simulation Results., TRANSACTION of the ASAE, 22, pp. 178 - 187 (1977).
14. Harnoy A., Radajewski W., Optimization of Grain Drying With Rest periods, J. Agric. Engng. Res., 27, pp. 291-307 (1982).
15. Fraser B. M., Muir W. E., Energy Consumations Predicted for Drying Grain with Ambient and Solar - heated Air in Canadá, 25, pp. 325 - 331. (1980).
16. Bridges T. C., Loewer D. J., Walker J. N., Overhults D.G., A Computer Model for Evaluating Corn Harvesting, Handling, Drying and Storage Systems, TRANSACTIONS of the ASAE, pp. 618 - 622 (1979).
17. Akyurt M. and Selçuk M. K., Solar Drier Suplemented with Auxiliary Heating Systems for Continuous Operation., Solar Energy, Vol. 14, pp. 313 - 320 (1973).
18. Buelow F. H., Drying crops with solar heated air. SOLAR PAPER 17 pp. 204 - 208.
19. Morey R. V., Claud H. A., Gustafson R. J., Peterson D.W. Evaluation of the Feasibility of solar energy grain drying, TRANSACTION of the ASAE, pp. 409 - 417 (1979).
20. Palacio A., Rodríguez A., "Análisis del secado solar por estratos", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM (1980).

21. Gunasekaran Sundaram, Optimal Energy Management in Grain Drying, Department of Agricultural Engineering, Newark, Delaware (1986).
22. Sharp J. R., A Review of low temperature Drying Simulation Models, J. Agric. Engng. Res., 27, pp 169 - 190 (1982).
23. Holman J. P., Heat Transfer, McGraw Hill International Student Edition fifth edition, Japan (1981).
24. Duffie J. and Beckaman W., "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley and Sons, second edition N.Y. USA. (1980).
25. San Román O. y Fernández J. L., "Natural convection modeling for the experimental determination of radiative emissivity", Memorias del simposio IASTED-AMS'82, París, Francia, s/p (1982).
26. Fernández José L., Modelo Simplificado para Calcular Pérdidas Térmicas de Captadores Solares Planos, I.I. UNAM (1983).
27. Atlas de agua de la República Mexicana, SRH. (1975)
28. Normas Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional SAG, México, D.F., (1976).
29. Rodríguez A., Palacio A., "Factibilidad de Almacenamiento en el Secado Solar de Granos", Memoria Novena Reunión Nacional ANES, Mérida, Yuc., Vol. IX, pp. 145 - 146 (1985).
30. Fluod C.A., Sabbah M.A., Mecker D., Peart R. M., Simulation of a Natural Air Corn Drying System, Transf. of the ASAE 15 (1), pp 156 - 159, (1972).
31. Crank, J. The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press, Oxford (1956).

32. Brooker, D.B. Mathematical Model of the Psychrometric Chart, Trans. of the ASAE 10 (4), pp. 558 - 561 (1967).
33. Estrada V., Análisis Crítico de Procedimientos para Estimar la Radiación Solar. Tesis de Licenciatura, Fac. de Ing. UNAM, (1985).
34. Moreno M. Ernesto, "Análisis físico y biológico de semillas agrícolas", Instituto de Biología, UNAM, Primera edición, pp. 261 - 263 (1984).
35. Brooker Donald B., Bakker - Arkema Fred and Hall Carl W., Drying Cereal Grains, The AVI Publishing Company, Inc., Secund Printing, USA, (1978).
36. Fohr J. P. and Figueiredo A. R., Agricultural Solar Air Collector: Design and Performances, Solar Energy, Vol. 38 No. 5, pp. 311 - 321 (1977).
37. Lenel U. R. and Mudd P. R., A review of Materials for Solar Heating Systems for Domestic Hot Water, Solar Energy, Vol. 32 No. 1, pp. 109 - 120 (1984).
38. Fernández J. L., Estrada Vicente, Cálculo de la Radiación Solar Instantánea en la República Mexicana, I.I. UNAM (1982).
39. Rossi Sílvio J., Roa Gonzalo, Secagem e Armazenamento de Productos Agropecuários com uso de Energia Solar e Ar Natural, ACIESP No 22, pp 35 (1980)

A P E N D I C E

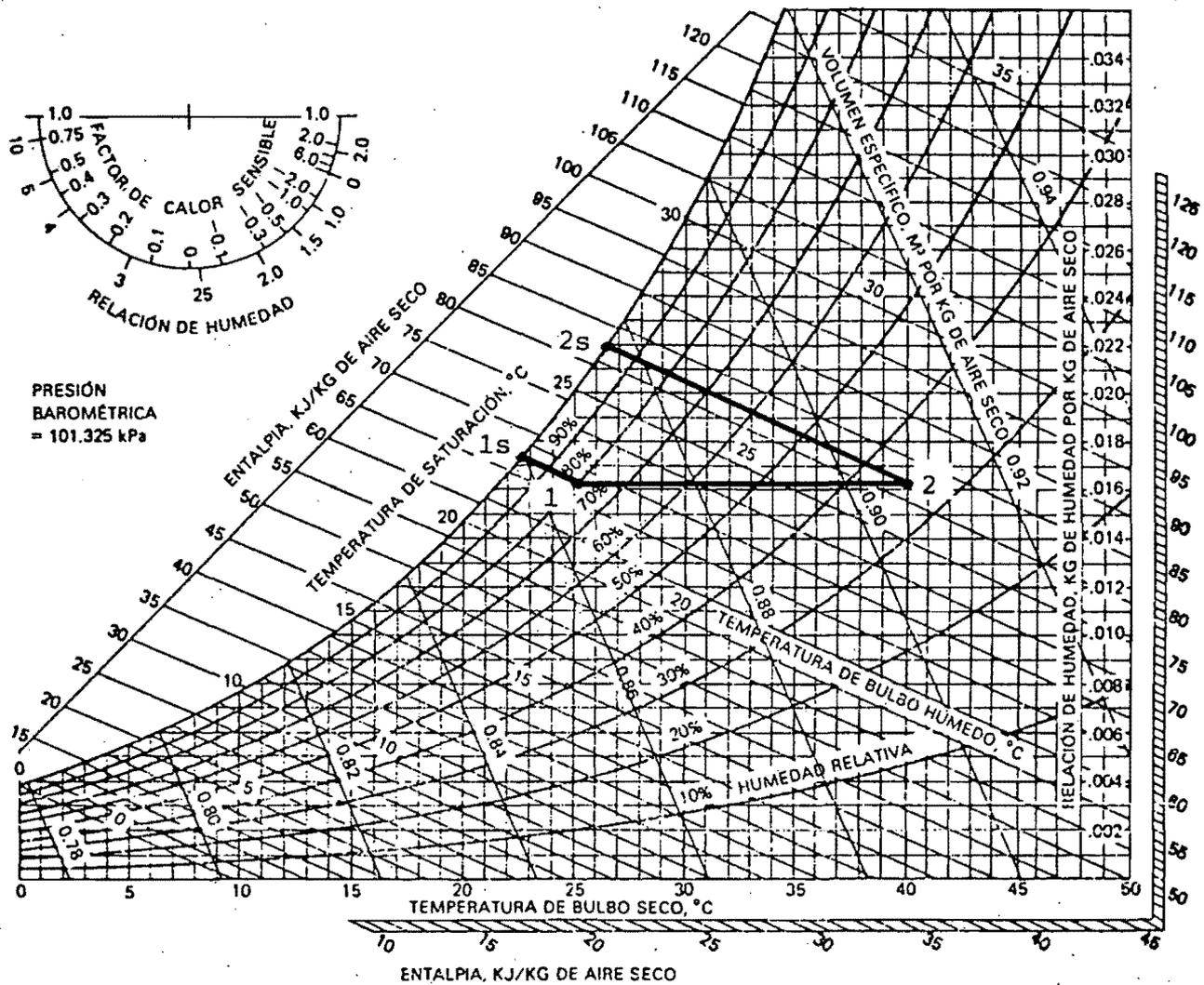


Fig A1 Carta psicrométrica en unidades del sistema métrico. Se indica un proceso de calentamiento sensible del aire, del punto 1 al 2. El humedecimiento adiabático se indica con el subíndice "s".

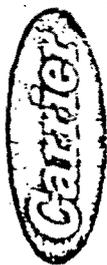


GRÁFICO PSICOMÉTRICO
TEMPERATURAS NORMAIS

PRESSÃO ATMOSFÉRICA : 77,100 MPa
ALTITUDE = 2250 m

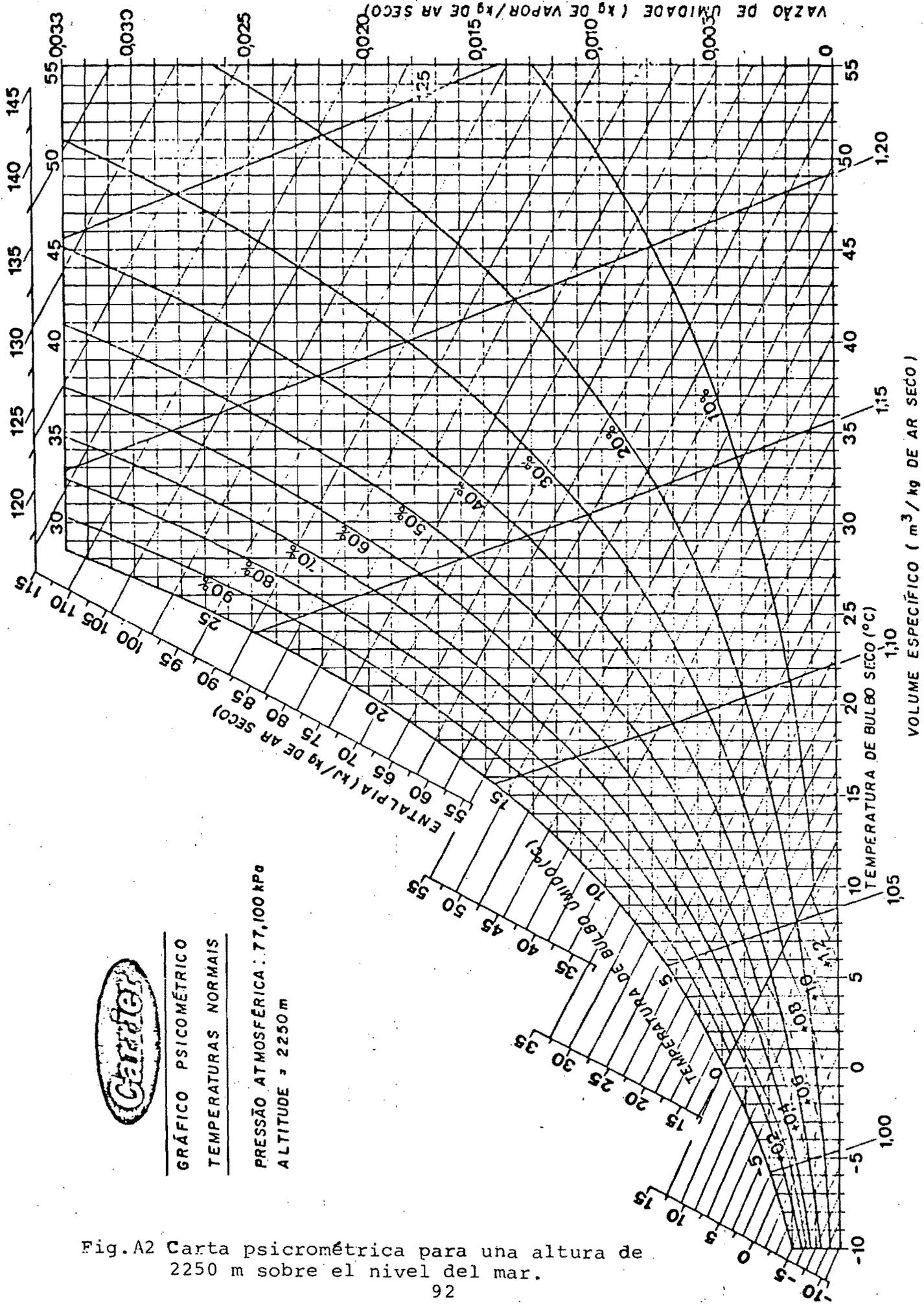


Fig.A2 Carta psicrométrica para una altura de 2250 m sobre el nivel del mar.

Tabla A1

Contenido en humedad del grano	Temperaturas máximas del aire para no poner en peligro la capacidad de germinación.
(%)	(°C)
18	67
20	61
22	57
24	53
26	50
28	47
30	43

Fuente: ref. 39

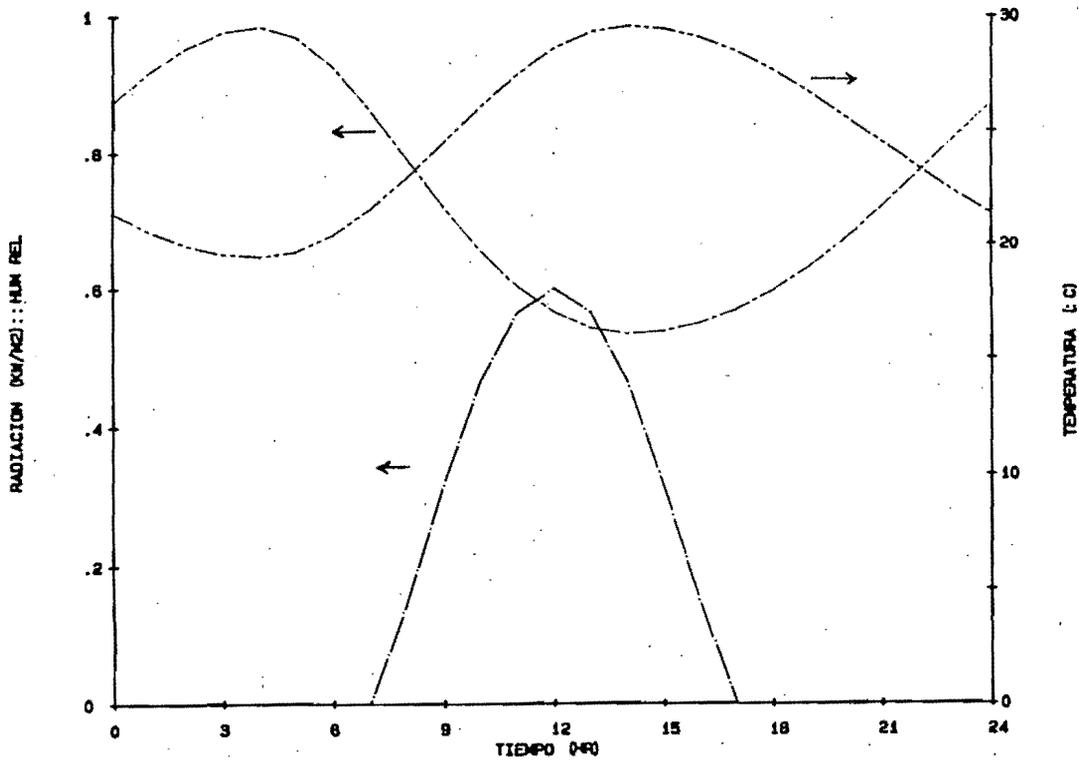


Fig A3 Variación horaria de la radiación solar, la temperatura y la humedad ambiental durante el mes de noviembre en el estado de Veracruz (Fuente: ref. 29)

Fig A4 Diagrama de flujo del programa de simulación del proceso de secado de granos auxiliado con energía solar.

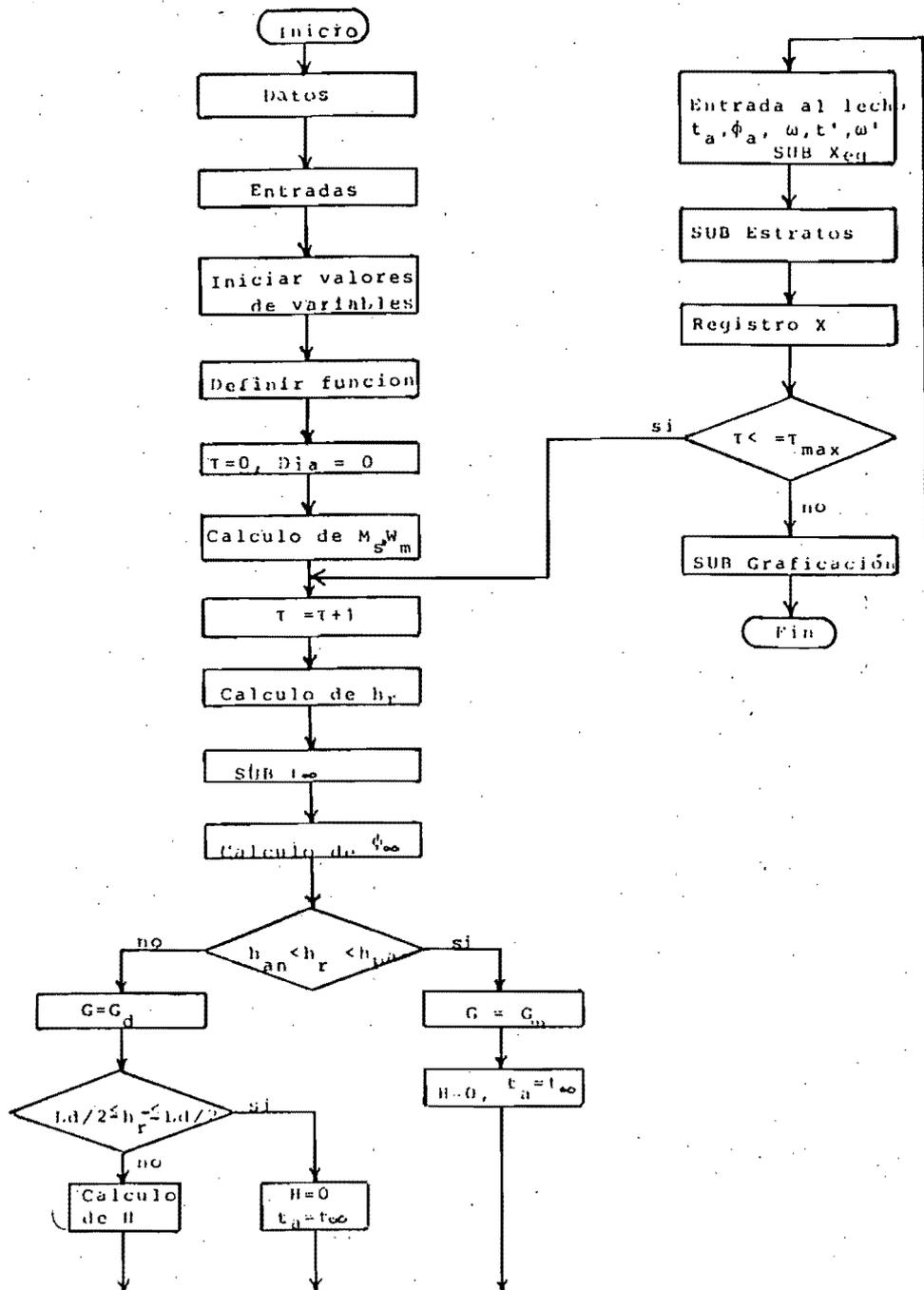
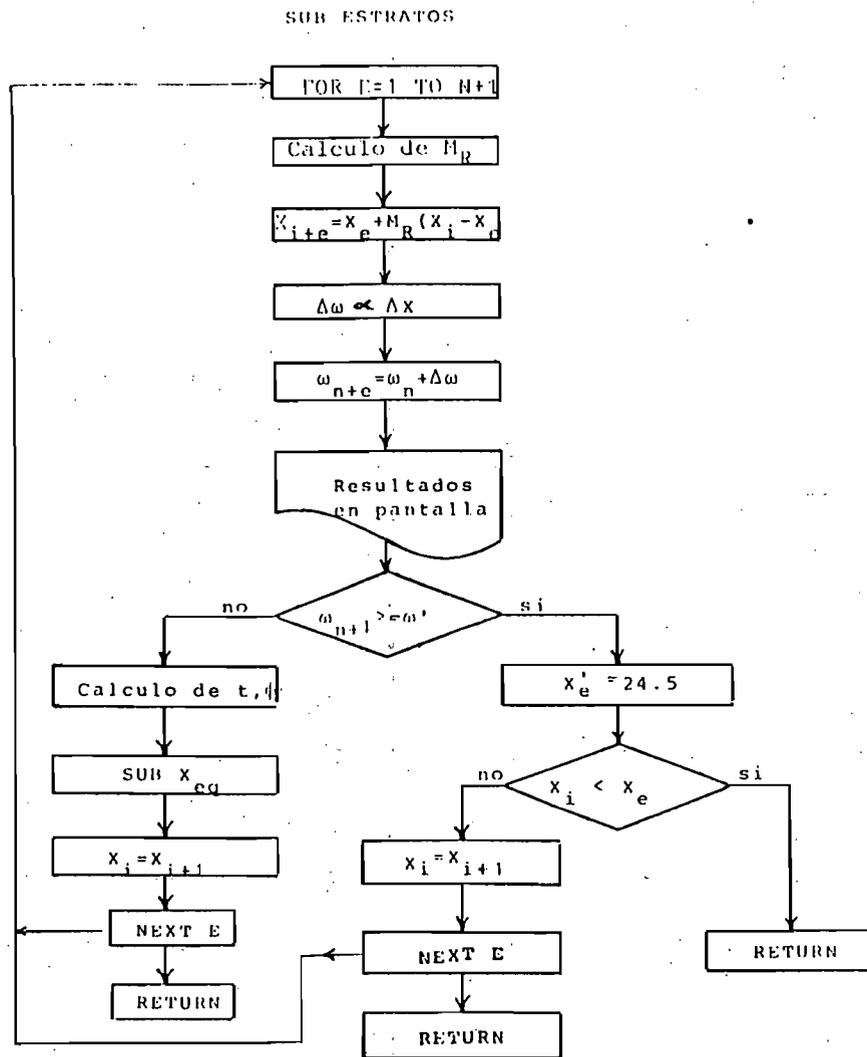


Fig A4 (cont.)



```

5 PRINT "*****"
10 PRINT "* PROGRAMA DE SIMULACION DE SECADO *"
15 PRINT "* SOLAR DE MAIZ *"
20 PRINT "*****"
25 DIM Z(200,500),X(200),Y(200),Z1(200,6)
30 READ K,K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7,K8
35 DATA 42E-5,48.93,-6833.959,-5.16923,3.1415,58.752,0.61,.06526,.622
40 READ I,R1,C2,L5,C2,A0
45 DATA 1,.287,1.005,1.52E-3,1.007,0.68
50 PRINT "DATOS NECESARIOS PARA CORRER EL PROGRAMA"
55 PRINT "PRESION ATM (KPS)?,RADIACION TOTAL MEDIA MENSUAL (KW/M2)?";
60 INPUT P3,G8
65 PRINT "RADIACION DIRECTA MEDIA MENSUAL?,LATITUD DEL LUGAR?";
70 INPUT G7,F
75 PRINT "TEMPERATURA AMBIENTE MAX(C)?,TEMP. AMB. MIN?,TEMP. MEDIA?";
80 INPUT T,T7,T3
85 PRINT "HUMEDAD RELAT.(DECIMAL)?,HUME. INIC.(B.S.)?,HUME. FIN.?";
90 INPUT F3,X0,X5
95 PRINT "TONS A SECAR?,HR.ARRANQUE(TI.SOLAR)?,HR.PARO?,VELOC. VIENTO?"
100 INPUT C5,H1,H2,V
105 PRINT "MTRS2 D COLEC/MTR2 DE GRAN.?,BETA 35?,DIA DEL AÑO (0-365)?";
110 INPUT A5,B5,N1
115 PRINT "PROF. DEL LECHO(MTS)?,GASTA ESPEC. AIRE(M3/MIN TON)?";
120 INPUT L1,Q2
125 PRINT "HORAS A GRAFICAR?, ORIENTACION DEL COLECTOR(N-S=1,E-O=2)?"
130 INPUT C1,0
135 R=3.1416/180
140 N=L1*100
145 G2=5
150 PRINT 0,"";C1;"";0;"";1;"";1
155 DEF FN P(X)=100*EXP(K1+K2/(X+273))+K3*LOG(X+273))
160 DEF FN D(X)=(4*EXP(X/(1+X)*0.254))*1E-6
165 T9=0
170 D0=0
175 GO TO 190
180 PRINT "E";TAB(4);"T9";TAB(9);"T4";TAB(20);"X";

```

```

185 PRINT TAB(30);"Y";TAB(39);"F9";TAB(50);"W";TAB(59);"W8";TAB(70);"T2"
190 FOR E=1 TO N
195 Y(E)=XJ
200 NEXT E
205 IF XJ<=0.202 THEN R0=12.8*EXP((XJ/(1+XJ))-8.422)/(-2.051)
210 IF XJ>=0.2468 THEN R0=12.8*EXP((XJ/(1+XJ))-4.2237)/(-1.015)
215 IF XJ>.202 AND XJ<.2468 THEN R0=12.8*EXP((XJ/(1+XJ))-2.35)/(-.5424)
220 V0=1000*C5/R0
225 A6=V0/L1
230 A2=A5*A6
235 D7=(A2/75)**0.5
240 L7=75*D7
245 A1=K4*D7*L7
250 D1=D7-0.0003
255 V1=4*Q2*C5/(60*K4*D1**2)
260 M5=L1*R0/(1+XJ)/N
265 W3=K8*F3*FN P(T3)/(P3-F3*FN P(T3))
270 V5=R1*(T3+273)*(1+W3/K8)/P3
275 IF A5=0 THEN 285
280 Q=V5*G4/A5/60
285 T9=T9+1
290 CO=0
295 P6=W3*P3/(K2+W3)
300 W5=W3
305 H8=T9+H1-00*24
310 IF H8>=24 THEN GO TO 320
315 GO TO 330
320 00=00+1
325 N1=N1+1
330 D2=23.45*SIN(360*(284+N1)*R/365)
335 Y1=-TAN(F*R)*TAN(D2*R)
340 L2=(ATN(SQR(1-Y1**2)/Y1))/R
345 IF L2>0 THEN 355
350 L2=L2+180
355 L=(2/15)+L2

```

```

360 V7=-(H8-12)
365 I1=T-T7
370 GO SUB 580
375 G4=60*D4*Q2*C5/A6
380 G0=35*G4
385 IF H8<H1 THEN 400
390 IF H8>H2 THEN 400
395 GO TO 410
400 G=30
405 GO TO 415
410 G=G4
415 F9=P6/FN P(T4)
420 IF F9>1 THEN F9=1
425 GO SUB 880
430 GO SUB 920
435 W8=<B*P8/(P3-P8)
440 GO SUB 1000
445 S=1
450 FOR E=1 TO N STEP 1
455 Z(T9,S)=(Y(E)-X6)/(X0-X6)
460 IF T9=0 THEN Z(T9,S)=1
465 IF T9>2 THEN 475
470 GO TO 430
475 IF Z(T9,1)>=Z(T9-1,1) THEN 490
480 M=0.354E-3*T4**1.1955
485 GO TO 495
490 M=C.0000001
495 IF ABS(Z(T9,S))<=0.01 THEN Z(T9,S)=0
500 S=S+1
505 NEXT E
510 IF T9<C1 GO TO 205
515 FOR T9=1 TO C1
520 J1=1
525 FOR G1=1 TO G2
530 Z1(T9,G1)=0

```

```

535 FOR C=J1 TO (G1*(N/G2))
540 Z1(T9,G1)=Z1(T9,G1)+Z(T9,C)
545 NEXT C
550 J1=C
555 NEXT G1
560 PRINT T9;" ";Z1(T9,1)*G2/N;" ";Z1(T9,2)*G2/N;" ";Z1(T9,3)*G2/N;
565 PRINT " ";Z1(T9,4)*G2/N;" ";Z1(T9,5)*G2/N;" ";Z(T9,N);" ";0
570 NEXT T9
575 GO TO 1190
580 REM."SUB RUTINA TEMP AMB"
585 W1=15*V7
590 IF V7>=-2 THEN 605
595 T2=T7+I1/2+I1/2*SIN(3.1416/2+3.1416*(V7+2)/(22-L/2))
600 GO TO 610
605 T2=T7+I1/2+I1/2*SIN(3*3.1416/2+3.1416*(V7-L/2)/(L/2+3))
610 T0=T2+1.2
615 T5=T0+0.5
620 E0=(0.0082*V**0.32395)+2.71828**(0.00552*T2)
625 J=(1.036*V**(-0.0075))*T2**0.00056
630 Z0=(1-(COS(D2*R))**2*(SIN(W1*R))**2)**0.5
635 Z3=SIN(F*R)*SIN(D2*R)+COS(F*R)*COS(D2*R)*COS(W1*R)
640 IF D=2 THEN 650
645 Z0=(Z3**2+(COS(D2*R))**2*(SIN(W1*R))**2)**0.5
650 Z2=COS(D2*R)*COS(F*R)*COS(W1*R)+SIN(D2*R)*SIN(F*R)
655 R2=Z0/Z2
660 J0=V7*180*R/L
665 S0=ABS(COS(J0))
670 G3=G7+S0**1.5
675 G9=G8*S0**1.2
680 G5=G9-G3
685 IF V7=L/2 THEN 710
690 IF V7<-L/2 OR V7>L/2 THEN 720
695 G6=G3*R2+G5
700 G6=INT(G6*100**1+0.5)/100
705 GO TO 725

```

```

710 G6=0.02
715 GO TO 725
720 G6=0
725 C7=C7+G6
730 M0=T0+273
735 R5=270.9575*M0**(-1.0024)
740 D4=270.9575*M0**(-1.0024)
745 M2=V1*D4*3.1415*(D1**2)/4
750 U=(2.4661*10**(-7))*(M0**0.756394)
755 K0=(1.770056*10**(-7))*M0**0.876236
760 P0=1.24998*M0**(-0.099624)
765 R6=V1*D1*R5/U
770 IF R6>10000 THEN 785
775 N3=1.35*(R6*P0*D1/L7)**(1/3)
780 GO TO 790
785 N3=0.023*(R6**0.8)*(P0**0.333)
790 H9=N3*K0/D1
795 IF T5-T2<=0 THEN 810
800 R7=EO*(T5-T2)**J*(0.45/D1)**(0.124*V**0.55)/(T5-T2)
805 U3=1/(0.5*D7*LOG(0.5*D7/(0.5*D1)))/K+1/R7)
810 F1=49/(49+U3)
815 F2=M2*C2/(A1*U3+F1)
820 F0=F2*(1-EXP(-1/F2))
825 F4=F1+F0
830 U1=A2*F4*G6+A0-A1*U3*(T0-T2)*F4
835 T4=T0+U1/(M2*C2)
840 T5=T0+((U1/A2)/(U3*F4))*(1-F4)
845 M1=T0+((U1/A2)/(U3*F4))*(1-F0)+273
850 IF ABS(M1-M0)<=0.001 THEN 865
855 M0=(M0+M1)/2
860 GO TO 735
865 C6=C6+U1
870 PRINT -V7,T2,T4,G6,T4-T2
875 RETURN
880 REM "SUB ROUTINA HUM. EQ."
885 IF F9<=0.95 THEN GO TO 895
890 GO TO 905
895 X3=(14.07*F9+4.1775)/100

```

```

900      GO TO 910
905      X8=(35.0+FP-13.53)/100
910      X5=X8/(1-X8)
915      RETURN
920      REM "SUB RUTINA PSICROM"
925      T6=T4+273
930      P1=1.5*P6
935      T1=T6-(P1-P6)/K7
940      A=K1+K2/T1-LOG(T1**(-K3)*P1/100)
945      B=(K2/(K7*T1**2)+K3/(K7*T1)-1/P1)
950      P2=P1-A/B
955      D5=ABS(P2-P1)/P1
960      IF D5<3E-5 GO TO 985
965      P1=P2
970      H5=2501.4-2.33*(T1-273)
975      K7=C3*(P3-P1)/(K8+H5)
980      GO TO 935
985      T8=T1-273
990      P8=P2
995      RETURN
1000     REM "SUB RUTINA ESTRAT"
1005     - E=C0+1
1010     S1=0
1015     FOR Z =1 TO 6
1020     S2=(1/(2*Z-1)**2)*EXP(-1/4*(2*Z-1)**2*(K4/L6)**2*FN D(Y(E))*I)
1025     S1=S1+S2
1030     NEXT Z
1035     M8=(3/K4**2)*S1
1040     X(E)=X5+M8*(Y(E)-X5)
1045     D3=(Y(E)-X(E))*M5/(3*I)
1050     W=W5+D3
1055     GO TO 1075
1060     PRINT E;T9;INT(T4+1000+.5)/1000;INT(X(E)+1000+.5)/1000;
1065     PRINT INT(Y(E)+1000+.5)/1000;INT(FP+1000+.5)/1000;
1070     PRINT INT(W+1000+.5)/1000;INT(W8+1000+.5)/1000;INT(T2+1000+.5)/1000
1075     IF W>=W8 THEN GO TO 1125

```

```

1030 P6=W*P3/(K5+W)
1035 T4=T8+(P8-P6)/K7
1090 F9=P6/FN P(T4)
1095 GO SUB 880
1100 Y(E)=X(E)
1105 W5=W
1110 CO=CO+1
1115 IF E<N THEN 1005
1120 RETURN
1125 X5=0.27
1130 W=W8
1135 D6=W-W5
1140 X(E)=Y(E)-D6*G*I/M5
1145 F9=1
1150 IF X5<=Y(E+1) THEN GO TO 1180
1155 Y(E)=X(E)
1160 W5=W
1165 CO=CO+1
1170 IF E<N THEN 1005
1175 RETURN
1180 Y(E)=X(E)
1185 RETURN
1190 C9=C7*A2
1195 E7=C6/C9
1200 Q1=V1*50*3.1416*(D7**2)/(4*A2)
1205 PRINT
1210 PRINT
1215 PRINT "EFICIENCIA=";E7;"Q1=";Q1;"M2=";M2;"L7=";L7;"D1=";D1
1220 END

```

ECUACION DE CLAUSIUS-CLAPEYRON

Una sustancia simple normalmente tiene dos grados de libertad. Sin embargo, si exigimos que coexistan en equilibrio dos fases de la sustancia, entonces sólo permanece un grado de libertad. La presión y temperatura de una masa determinada de agua pueden escogerse a voluntad; pero si el agua ha de estar en equilibrio con su vapor, entonces la presión, que es ahora por definición la presión de vapor, resulta ser una función unívoca de la temperatura. Si la presión aumenta por encima de la presión de vapor, entonces el vapor condensará. Si se reduce por debajo de dicho valor el líquido evaporará.

La ecuación de Clausius-Clapeyron expresa el cambio de presión de vapor con la temperatura y se puede usar para calcular la presión de vapor de agua del aire húmedo. Puesto que la temperatura del aire húmedo empleado para el secado de granos es removido del punto crítico de vapor de agua, dicha ecuación se puede escribir como:

$$\frac{dp_v}{dT} = \frac{hfg}{TV_v} \quad (A1)$$

EVALUACION DE LAS CARACTERISTICAS PSICROMETRICAS DEL AIRE DURANTE EL PROCESO DE SECADO.²⁰

Para determinar la humedad específica W en función de la humedad relativa ϕ , 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:

$$\begin{aligned} m_v &= P_v V / R_v T \\ m_a &= P_a V / R_a T \end{aligned} \quad (A2)$$

Se tiene además:

$$\begin{aligned} V_v &= V_a = V \\ P_b &= P_v + P_a \end{aligned}$$

Y por lo tanto:

$$W = \frac{m_v}{m_a} = \frac{R_a P_v}{R_v P_a} = \frac{R_a P_v}{R_v (P_b - P_v)} \quad (A3)$$

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

$$\therefore W = 0.622 \frac{\phi P_{vs}}{P_b - \phi P_{vs}} \quad (A4)$$

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:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{fg} = \frac{h_{fg}}{T (v_g - v_f)} \quad (A5)$$

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

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

$$\frac{dP}{P} = \frac{h_{fg}}{R} \frac{dT}{T^2} \quad (A6)$$

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

$$P_{vs} = \text{Exp} \left\{ 54.6329 - \frac{12301.633}{T} - 5.16923 \ln T \right\} \quad (A7)$$

Para T expresada en °R y es válida para $32^\circ\text{F} \leq T < 200^\circ\text{F}$

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 (ϕ_a, T_a) a (ϕ_o, T_o) se obtiene la expresión:

$$\phi_a P_{vs}(T_a) = \phi_o P_{vs}(T_o) \quad (A8)$$

$$\phi_o = \phi_a \frac{P_{vs}(T_a)}{P_{vs}(T_o)}$$

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,

$$(c_a + W c_v) (T_{bs} - T_{bh}) = h'_{fg} (W' - W) \quad (A9)$$

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 (A3) y (A7) se obtiene,

$$c_a \left\{ 1 + \left(\frac{P_v}{P_b - P_v} \right) \frac{R_a}{R_v} \frac{c_v}{c_a} \right\} (T_{bs} - T_{bh}) = h'_{fg} \frac{R_a}{R_v} \left\{ \frac{P'_{vs}}{P_b - P'_{vs}} - \frac{P_v}{P_b - P_v} \right\} \quad (A10)$$

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,

$$c_a (T_{bs} - T_{bh}) = 0.622 h'_{fg} \frac{P_{vs}' - P_v}{P_b - P_{vs}'}$$

equivalente a,

$$P_{vs}' - P_v = \frac{c_a (P_b - P_{vs}')}{0.622 h'_{fg}} (T_{bs} - T_{bh}) \quad (A11)$$

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 (A11) a,

$$P_{vs}' - P_v = K (T_{bs} - T_{bh}) \quad (A12)$$

Para determinar T_{bh} y P_{vs}' conociendo T_{bs} y P_v se recurre a un proceso iterativo empleando el método de Newton-Raphson para encontrar los ceros de funciones con las ecuaciones (A7) y (A12). 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.

Cambio de humedad del grano²⁰

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

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \quad (A13)$$

De investigaciones realizadas 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. Al exponer una capa delgada de grano caliente a un gasto relativamente grande de aire frío, el grano se enfría $0.9(T_g - T_a)$ en 48 s. 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,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \quad (A14)$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial y} = h' f_g \frac{\rho_g}{G(c_a + c_v W)} \frac{\partial X}{\partial t}$$

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 in finito; donde r_0 es la distancia mínima del centro a la superficie:

$$\frac{X_t - X_a}{X_0 - X_a} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^5 \frac{1}{(2n+1)^2} \text{Exp} \left\{ - \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4r_0^2} Dt \right\}$$

Considerando incrementos del tiempo Δt ,

$$\frac{X(y,t) - X_e}{X(y,t-\Delta t) - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^6 \frac{1}{(2n-1)^2} \text{Exp} \left\{ - \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4r_0^2} D \Delta t \right\} \quad (\text{A15})$$

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 $\phi > 1$, 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.

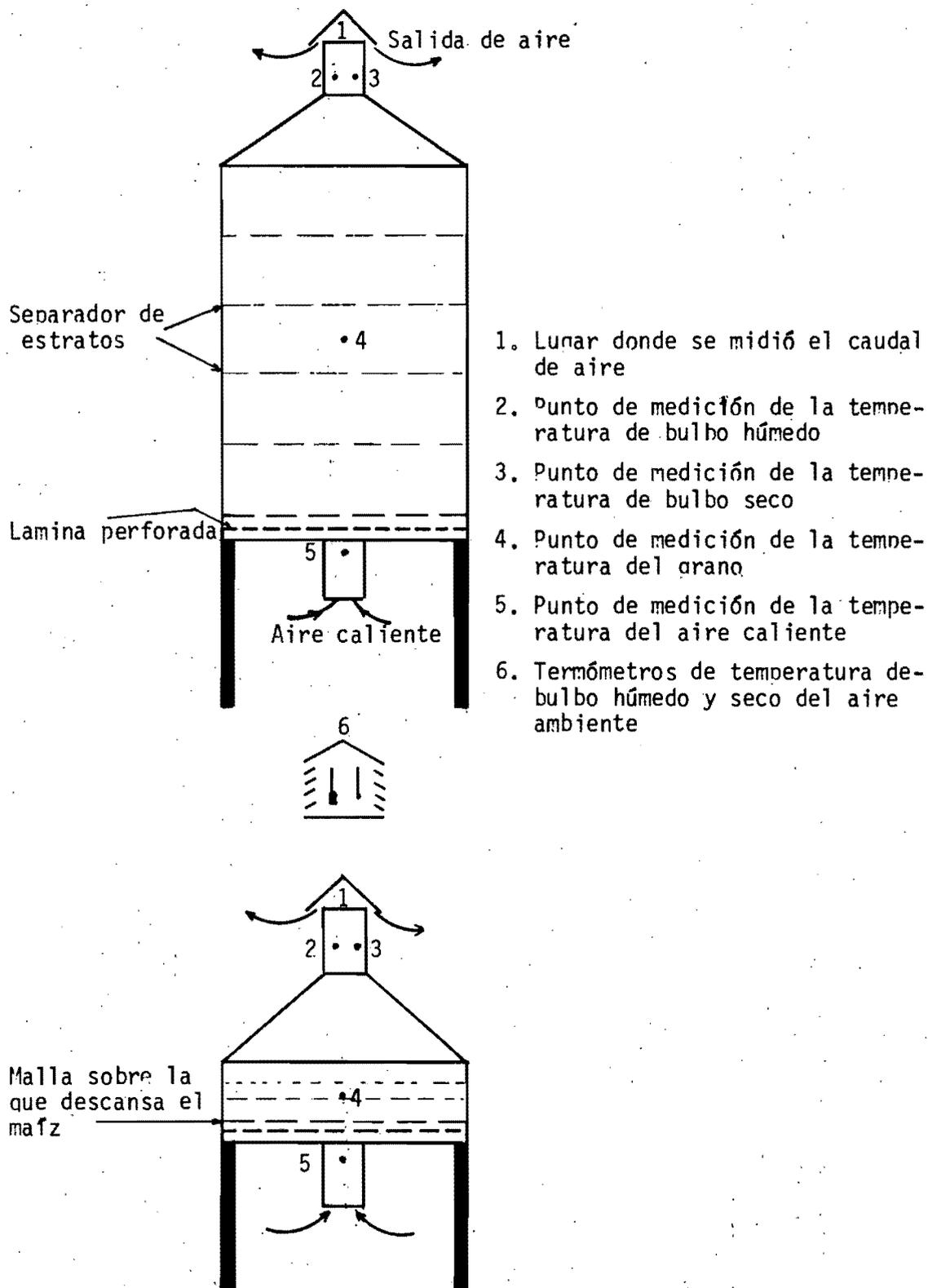


Fig. A5 Esquema que muestra los lugares en los que se tomarán las mediciones de las temperaturas y del caudal de aire.