

## SECADO SOLAR DE GRANOS \*

Miguel A. Lara, Alberto Cortés, Roberto Gaspar y  
Rubén D. Piacentini +

Grupo de Energía Solar, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, U. N. de Rosario, Pellegrini 250, 2000 Rosario.

### Resumen

En el presente trabajo se exponen los primeros resultados relativos al secado de granos, empleando energía solar como fuente de calor. El prototipo experimental consta de un silo con sistema de aereación, diseñado para lograr una eficiente distribución interna del calor y un colector solar cuyas características principales son las de su versatilidad y sencillez de construcción. Se presentan datos obtenidos in situ (en el Campo Experimental de Zavalla, dependiente de la Facultad de Cs. Agrarias, U. N. de Rosario) del funcionamiento en periodo invernal del conjunto colector-silo con carga de soja. Las posibilidades de aplicación práctica del sistema ensayado, en clima templado-calido y húmedo son analizadas.

### Abstract

Experimental results related to grain drying employing solar energy as a heat source are described. The prototype consists of a bin with an aereation system designed for obtaining an efficient internal distribution of heat, and a solar collector of simple structure. Data obtained in situ (Experimental Field of Zavalla, Agrarian Sciences Faculty, University of Rosario) for winter operation of system for soya drying are shown. Possible practical applications in humid moderate climates are discussed.

### 1. Introducción

El secado de granos se ha efectuado tradicionalmente por exposición al Sol o por aereación natural. En las últimas décadas se ha extendido el empleo de secadoras (que efectúan un secado rápido mediante flujo de aire caliente). Esta última técnica, si bien tiene las ventajas de poder tratar una gran cantidad de granos (hasta unas 50 tn.h.<sup>-1</sup> para unidad tipo) y ser independiente de los factores ambientales, tiene un consumo energético elevado y la calidad del

\* Trabajo realizado bajo los auspicios del Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Santa Fe (Argentina).

+ Miembro de la Carrera de Investigador Científico del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

grano resulta generalmente afectada. Este deterioro es más acentuado en el poder germinativo y contenido proteico del producto.

Una posible alternativa consiste en emplear un sistema solar de secado indirecto, con un colector que capte la energía solar en forma más eficiente que la simple exposición y la transfiera luego a los granos bajo forma de calor. Dispositivos de estas características han sido ensayados en la zona maicera de E.U.A. /1/ y en Brasil /2/, pero los resultados obtenidos no son directamente aplicables a nuestra región.

El objeto del presente trabajo es el de estudiar el secado solar en una zona de clima templado cálido y húmedo, particularizando el mismo para el secado de soja en el período invernal.

## 2 Analisis del Proceso de Secado

En regiones de clima húmedo es usualmente necesario efectuar el secado de los granos recolectados, debido a que su contenido de humedad supera el máximo permitido para su conservación a largo plazo (ver Tabla I). Este tratamiento se ha difundido últimamente en virtud de normas más estrictas en la comercialización de granos y de la recolección anticipada de éstos. El adelanto de la cosecha hasta en varias semanas previene pérdidas por insectos y condiciones climáticas adversas, posibilita en ciertos casos una siembra adicional, etc. Un secado del grano posterior a su recolección evita la formación de un medio favorable al crecimiento de agentes destructores (horgos, insectos), posibilitando su conservación a largo plazo.

El contenido de humedad de un grano, que es la variable fundamental en la descripción de un proceso de secado, se define a través de la siguiente relación:

$$W = 100 \cdot \frac{m_h - m_s}{m_h} \quad (\%) \quad (1)$$

donde  $m_h$  y  $m_s$  son las masas de los granos húmedos y secos, respectivamente. El considerar  $m_h$  en el denominador, implica que se ha tomado "base húmeda" para la definición de  $W$ .

Existen distintos métodos de deshidratación de granos. La técnica habitual consiste en hacer circular aire a temperatura elevada (unos 85°C) durante un tiempo corto (valor típico de una hora, en secadoras discontinuas). El que más se adapta al aprovechamiento de la energía solar es el secado a bajas temperaturas. Consiste en el uso de aire calentado solamente unos pocos grados por encima de su valor ambiente. Desde el punto de vista solar, esto representa una ventaja pues permite aplicar el método aún en días nublados. La pequeña capacidad térmica del aire, sumada a bajos coeficientes de transferencia de calor y de masa, obligan a extender el proceso de secado durante varios días. Obviamente, este método no es aplicable en los casos en que la conservación del

producto requiera un secado rápido e inmediato. Ese no es el caso de la mayoría de los granos. En los mismos, la reducción requerida del contenido de humedad oscila normalmente entre el 4 y el 17% .

Tabla I. Contenido de humedad durante la recolección ( $W_r$ ), valores requeridos para su conservación durante un año ( $W_{c1}$ ) y durante 5 años ( $W_{c5}$ ). Se indican valores aproximados. Recopilación propia y /3/.

GRANO	$W_r$	$W_{c1}$	$W_{c5}$
Arroz	16-25	12-14	10-12
Avena	10-18	14	11
Cebada	10-18	13	11
Centeno	12-18	13	11
Girasol	10-18	11	10
Maíz	13-30	13	10-11
Soja	10-18	12	10-11
Sorgo	10-20	12-13	10-11
Trigo	9-17	13-14	11-12

### 3. Descripción y Ubicación del Sistema

El prototipo experimental, tal como se detalla en la figura 1.a, consta esencialmente de dos partes: el colector de aire y el silo contenedor de granos.

a) Colector solar: Está realizado según los requisitos básicos de versatilidad y simplicidad de construcción a los efectos, respectivamente, de multiplicar sus usos en el agro y de reducir al máximo los costos de inversión iniciales.

Se han construido dos modelos de colector:  $C_1$  y  $C_2$ . El  $C_1$  es de polietileno negro de 200 micrones de espesor. Un trozo de 1,5<sup>1</sup> por 6 m ha sido doblado por la mitad y soldado longitudinalmente a intervalos regulares, para formar conductos en una estructura tubular (Figura 1.b). El colector  $C_2$  (Figura 1.c) es el  $C_1$  más una cubierta de polietileno transparente de 200 micrones con tratamiento especial para disminuir la degradación por radiación ultravioleta. Esta cubierta externa se mantiene inflada por la presión del aire inyectado al sistema.

b) Silo: Ha sido construido en chapa de aluminio. Es de forma cilíndrica, con un alto de 1 m y un diámetro de 1,2 m. El techo y la tolva elevada son cónicas, habiéndose estimado la capacidad en 1 tonelada. La tapa superior puede rotar, de manera que desde una serie de orificios perforados en ella se pueden extraer granos prácticamente de cualquier punto del silo. La boca inferior ha sido diseñada para permitir, alternativamente, la aereación o la descarga de los granos. La circulación del aire dentro de los granos, se realiza mediante tubos perforados de P.V.C. de 0,025 m de diámetro ubicados de manera tal de asegurar una distribución uniforme del aire, tal como se muestra en la figura 1.d.

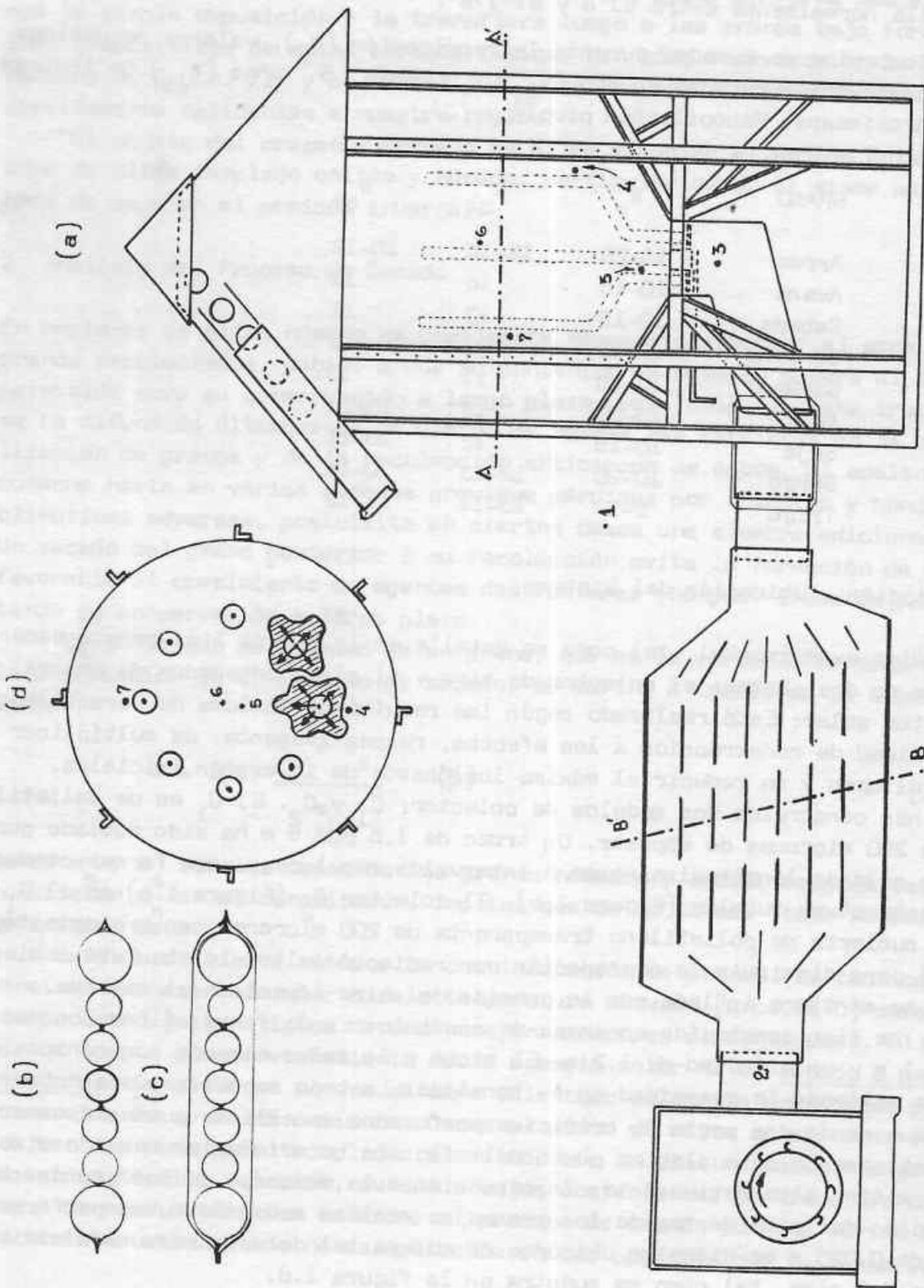


Figura 1. a) Sistema colector solar-silo contenedor de granos (los puntos numerados indican donde se miden las temperaturas). b) Corte BB' del colector C1 y c) Corte AA' del silo, detallando los tubos aereadores y la distribución del aire.

Componentes accesorios del sistema son:

- Ventilador centrífugo de 1,5 HP, con diafragma iris para variar el caudal de aire.
- Registrador selectivo de temperaturas, según el esquema de un trabajo anterior /4/. Los sensores son ahora elementos integrados, que dan mayor sensibilidad, respuesta lineal en temperaturas y no requieren compensación de temperaturas. Un diagrama del circuito electrónico diseñado para los mismos se da en el Apéndice.
- Registradores mecánicos de radiación solar, humedad y temperatura ambiente.
- Medidor de velocidad del aire.

El sistema ha sido instalado en el Campo Experimental Villarino, que la Facultad de Cs. Agrarias de la U. N. de Rosario posee en Zavalla, a unos 30 Km de Rosario. Alrededor del sitio donde se instaló el silo existen árboles, a una distancia mínima de 30 metros. Si bien éstos interceptan los vientos, también lo hacen con la radiación solar en las horas extremas del día.

La proximidad de la Estación Agrometeorológica a unos mil metros, es un factor altamente positivo, por el suministro periódico de datos ambientales y el conocimiento acumulado del clima durante los últimos cinco años.

#### 4. Aporte Solar

En la zona central de la Pampa Húmeda, la radiación anual global (directa y difusa) sobre una superficie horizontal es de unos  $1650 \text{ kWh.m}^{-2}$ . La distribución mensual varía en forma aproximadamente cosenoidal, con valores máximo y mínimo de  $200 \text{ kWh.m}^{-2}$  en enero y  $65 \text{ kWh.m}^{-2}$  en junio /5/.

El aprovechamiento de la energía solar puede mejorarse, orientando estacionalmente los colectores solares. Una primera aproximación consiste en inclinarlos de manera tal de tener incidencia normal al mediodía solar. Sin embargo, puede aún optimizarse el ángulo correspondiente considerando la radiación diaria interceptada para días claros /6/.

La radiación instantánea sobre una superficie es:

$$H = H_1 \cdot \cos \theta \quad (2)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia y  $H_1$  la radiación sobre una superficie normal al Sol. Para superficies orientadas al Norte,

$$\cos \theta = \cos(\phi + s) \cdot \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + s) \cdot \sin \delta \quad (3)$$

donde  $\phi$  indica latitud,  $s$  inclinación del colector respecto de la horizontal y  $\omega$  el ángulo horario, con el valor cero al mediodía solar. Llamando  $\omega_i$  y  $\omega_f$  los ángulos horarios a la salida y puesta del Sol, la radiación total diaria interceptada por la superficie es:

$$G = \int_{\omega_i}^{\omega_f} H_1 \cdot \cos \theta dt \quad (4)$$

Se define el factor angular de aprovechamiento diario,  $f$ , como:

$$f = \frac{G}{G_h} \quad (5)$$

donde  $G_h$  corresponde a una superficie horizontal.  $f$  es función de la inclinación. Para cada día del año,  $f$  puede ser maximado haciendo:

$$\frac{\partial f}{\partial s} = 0 \quad (6)$$

obteniéndose de (6) el  $s$  óptimo ( $s^*$ ). La variación de  $s^*$  es lenta a lo largo del año, de modo que se dan valores estacionales del mismo. En la tabla II se dan los valores  $s_{mx}$  para la condición de incidencia normal al mediodía solar, los de  $s^*$  y  $f$ , para  $s^*$  correspondientes a la zona de Rosario (latitud  $33^\circ$ ).

Tabla II. Optimización de la inclinación de los colectores solares en diferentes épocas del año.

Período	$s_{mx}$	$s^*$	$f(s^*)$
Diciembre- Enero	$13^\circ$	$\sim 0^\circ$	$\sim 1,00$
Marzo-Abril y Setiembre- Octubre	$33^\circ$	$33^\circ$	1,19
Junio-Julio	$55^\circ$	$63^\circ$	2,15

De la tabla anterior se observa que en verano  $s^* < s_{mx}$ , en otoño o primavera  $s^* = s_{mx}$  y en invierno  $s^* > s_{mx}$ . Se constata que la mejora por inclinación es casi 0 en verano, algo mayor en primavera u otoño, pero sensiblemente apreciable en invierno.

Aplicando los datos anteriores a un proceso de secado que se realice con un colector del tipo y dimensiones del  $C_1$  (unos  $7 \text{ m}^2$  en operación), que tenga una eficiencia del 40% y que se emplee una quincena de días cada estación (sólo dos meses sobre doce posibles) captará en total unos 846 kWh. A valores actuales de energía eléctrica rural, costo de material y mano de obra, la energía colectada cuesta (en equivalente eléctrico) varias veces más que el colector.

Otro detalle que surge del análisis del diagrama psicrométrico (que relaciona humedad y temperatura, ver por ejemplo /4/) es que un pequeño incremen-

to de temperatura da origen a una gran reducción de la humedad relativa del aire. Por ejemplo, subiendo 5°C por encima de la temperatura ambiente, la humedad relativa pasa de un valor inicial de 80% a 60%. Dado que la intensidad de radiación sobre un colector con inclinación optimizada es doble en verano que en invierno, la disminución es aún más significativa en la primera de las estaciones.

## 5. Resultados

A los efectos de observar el comportamiento de los colectores, las primeras pruebas se hicieron midiendo el incremento de temperatura para distintos caudales de aire, tratando de conservar constantes las demás condiciones. En la tabla III se consignan los datos correspondientes.

Tabla III. Variación de la temperatura del aire al pasar por el colector, en función de la velocidad del aire a la entrada del ventilador.

Colector C <sub>1</sub>		Colector C <sub>2</sub>	
v(m.s <sup>-1</sup> )	T(°C)	v(m.s <sup>-1</sup> )	T(°C)
2,6	8,5	2,8	8
3,7	6,5	3,5	8
4,9	5,5	4,6	6

Esos datos fueron obtenidos alrededor del mediodía del 1/6/78 con el colector en posición horizontal. Se observa que no existe una diferencia importante entre ambos. Ello se debe a que, al ser el ángulo de incidencia grande, las pérdidas ópticas son importantes en el colector C<sub>2</sub> en comparación con C<sub>1</sub>. Estas pérdidas no son compensadas por las menores pérdidas térmicas del mismo. Está prevista una segunda serie de ensayos in situ con los colectores inclinados, para comparar las prestaciones en condiciones de operación. Experiencias detalladas serán necesarias para determinar si la eventual mayor prestación de C<sub>2</sub> alcanza a amortizar el mayor costo del mismo (aproximadamente el doble de C<sub>1</sub>).

Los granos provistos por las autoridades del Campo Experimental tenían un contenido inicial de humedad  $W = (10,5 \pm 0,3)\%$ . Dicho contenido fue determinado pesando los granos húmedos y secándolos, luego de molerlos, durante dos horas en estufa a 130 C /3/.

El sistema colector-silo se operó durante seis horas dos días consecutivos (25 y 26 de Julio de 1978) fríos y nublados. Muestras extraídas con un calador al final del segundo día fueron sometidas al mismo proceso, dando un valor de  $W = (9,2 \pm 0,3)\%$ . Esta reducción de 1,3 puntos es relativamente importante si se tiene en cuenta el corto intervalo del tiempo de secado, las

condiciones climáticas desfavorables y el bajo contenido inicial de humedad del grano. Un análisis basado en el diagrama sicrométrico da resultados concordantes con los anteriores.

Mediante juegos de termómetros de bulbo seco y húmedo se determinaron las temperaturas ambiente y a la salida del silo. Tres conjuntos de datos correspondientes al primer día se dan en la Tabla IV, junto a la temperatura de entrada del silo ( $T_3$ ).

Tabla IV. Temperaturas requeridas para el análisis sicrométrico.

Hora local	$T_{s,amb}$	$T_{h,amb}$	$T_{s,sal}$	$T_{h,sal}$	$T_3$
11.20	13,5	11,3	12,3	11	20,6
12.25	15,7	12	14	12,1	28,4
17.10	15	11	17	11	19,5

Siguiendo el procedimiento usual /3/ se determina la velocidad de extracción de humedad del grano.

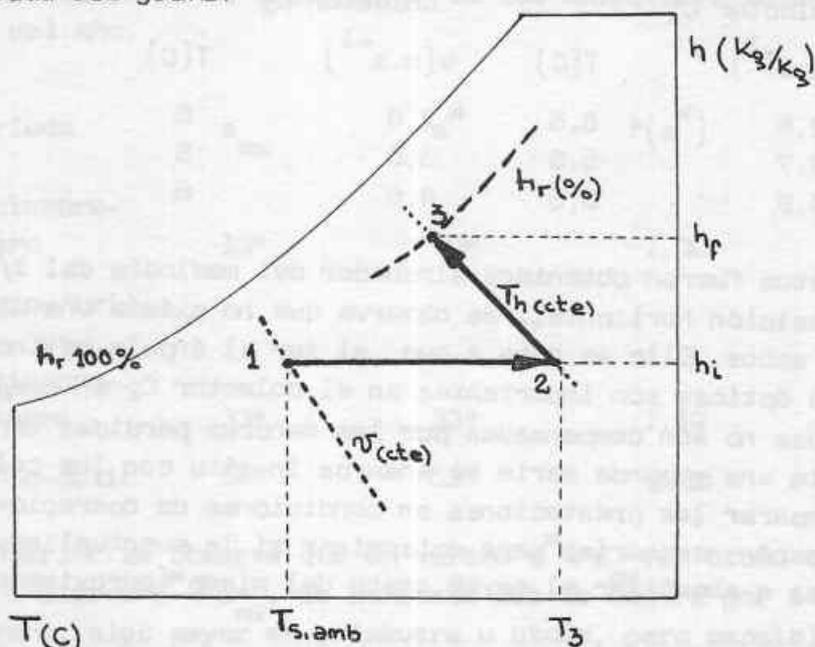


Figura 2. Esquema de uso del diagrama sicrométrico para el proceso de secado.

Con los datos ambientales se calcula el volumen específico inicial del aire seco ( $v$ ), determinándose con la recta  $v$  del diagrama y  $T_{s,amb}$  el punto 1. Su ordenada  $h_i$  es la humedad absoluta inicial. La intersección de la recta que pasa por 1 con la vertical de  $T_3$  determina el punto 2, siendo 1-2 (a  $h$  constante) la etapa de calentamiento de aire. Desde 2 se recorre la isoentálpica 2-3 hasta la curva de humedad relativa final  $h_r$ . El tramo 2-3 es la etapa de se-

cado, siendo la ordenada de 3 ( $h_f$ ) la humedad absoluta final. La diferencia de humedades absolutas, da la cantidad de agua extraída del grano por unidad de masa de aire. En la tabla IV se dan los resultados para los casos anteriores, junto a otras magnitudes de interés.

Tabla V. Temperatura y humedad ambientes, incremento de temperatura del aire a la entrada del silo y variación de humedad absoluta.

$T_{s,amb}(C)$	$T(C)$	$h_r,amb$	$\Delta h.10^3$
13,5	7,1	80	3,8
15,7	12,7	66	5,3
15	4,5	60	2,3

A modo estimativo, podemos considerar un  $\Delta h$  promedio entre los tres anteriores:  $\Delta h$  promedio =  $3,5 \cdot 10^{-3}$ .

En el ensayo, el valor medio del flujo de masa es  $246 \text{ kg.h}^{-1}$ , lo cual da una velocidad de extracción de  $0,86 \text{ kg.h}^{-1}$ . Para doce horas de operación, la reducción previsible es de  $10,3 \text{ kg}$ . Teniendo en cuenta la cantidad inicial de grano ( $770 \text{ kg}$ ) y el contenido inicial de agua ( $W=10,5\%$ ) el contenido final computado por el método sicrométrico es  $W=9,1\%$ , valor que se compara favorablemente (dentro del entorno de error) con el promedio del medido directamente por secado del cereal en estufa ( $9,2\%$ ), como se expresara antes.

La figura 3 muestra las gráficas correspondientes al primer día de secado, en función del tiempo de: radiación solar (3.a), humedad relativa ambiente (3.b), temperatura ambiente (3.c) y del sistema (3.d).

El día 25/7/78 fue de cielo prácticamente siempre cubierto con nubes medias del tipo Altocumulus en forma lenticular ( $C_L=0$ ;  $C_M=4$ ;  $C_H=6$ , según Código de la Organización Meteorológica Mundial). Sin embargo, la radiación total diaria fue de  $205 \text{ cal.cm}^{-2}$ , lo que implica aproximadamente un 89% de la radiación correspondiente a un día claro para esa época del año. Análogamente, para el día siguiente, con nubosidad aún más acentuada (Altocumulus asociados con Altostratus,  $C_L=0$ ;  $C_M=7$ ;  $C_H=0$ ) se registraron  $148 \text{ cal.cm}^{-2}$ , resultando un 65% del máximo posible. Estos altos porcentajes justifican la prosecución de un proceso de secado, aún en días nublados de invierno. El relativo gran aumento de la temperatura del aire a la salida del colector respecto de la entrada en el período central de ambos días, es consecuencia directa de lo descrito anteriormente. El rápido incremento de las temperaturas a la entrada del colector y del silo se debe a que el sistema comienza a funcionar a media mañana, cuando hay una importante cantidad de radiación solar incidente. El lento decrecimiento luego de pasar por su máximo valor es consecuencia evidente de la disminución de la radiación, ya que la temperatura am-

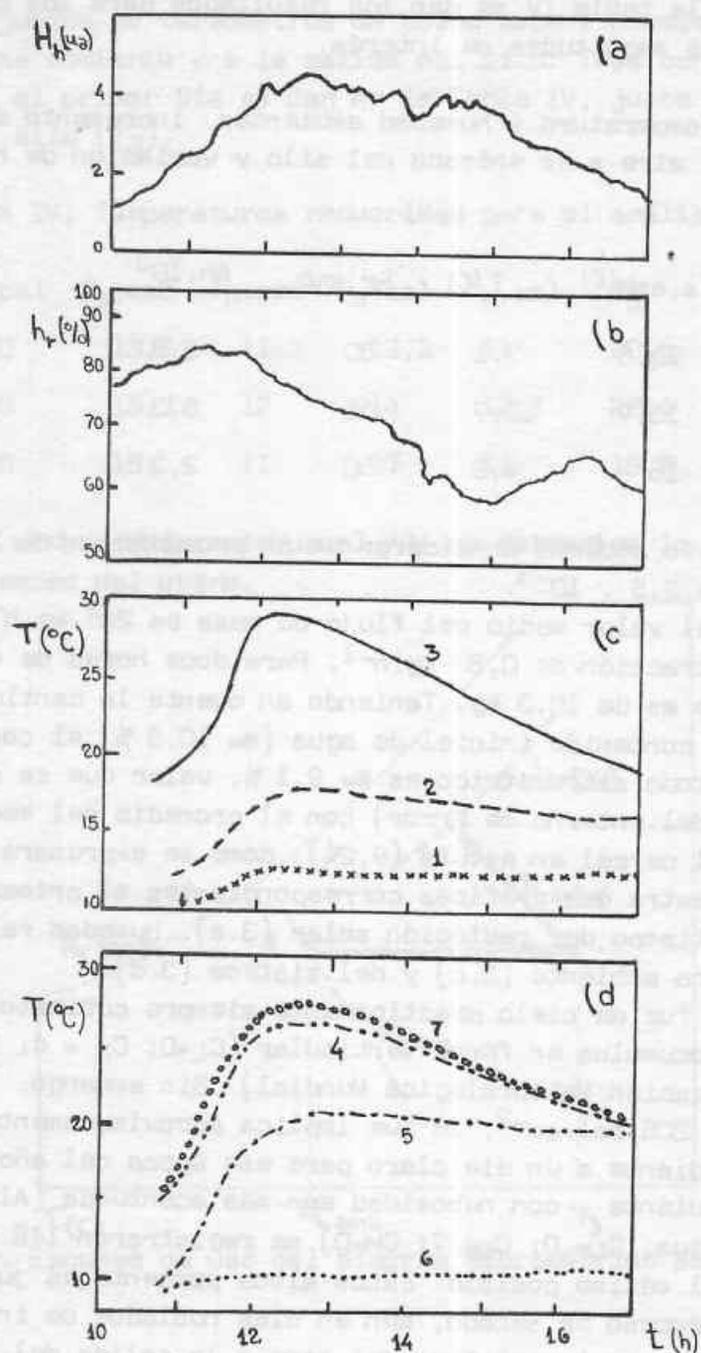


Figura 2. Mediciones correspondientes al día 25/7/78 de: a) radiación solar sobre un plano horizontal  $H_h$ , b) humedad relativa ambiente  $h_r$ , c) temperaturas ambiente ( $T_1$ ), de entrada al colector ( $T_2$ ) y de entrada al silo ( $T_3$ ) y d) del interior del mismo ( $T_4, T_5, T_6, T_7$ ), según el esquema de la figura 1.a. Los datos de  $H_h$  y  $h_r$  fueron suministrados por la Estación Agrometeorológica de la U. N. Rosario, Zavalla, Santa Fe.

biente permanece aproximadamente constante. En el interior del silo, las temperaturas siguen en general la evolución del aire entrante. Sin embargo, la zona central evoluciona mucho más lentamente. Ello indica la necesidad de incrementar los aportes en esa región. A tales efectos, en una posterior experimentación se agregará un conducto adicional de aereación no colocado al presente. Parte de la diferencia entre las temperaturas ambiente ( $T_1$ ) y de entrada al colector ( $T_2$ ) se debe a la energía entregada al aire por el ventilador. El resto es consecuencia que el sensor no está directamente ubicado a la salida del ventilador, sino luego de un corto elemento de interconexión pintado de negro.

## 6. Conclusiones y Perspectivas

Los resultados obtenidos muestran las amplias posibilidades que tiene el método de secado solar a bajas temperaturas, aún en períodos y para granos recolectados en la Pampa Húmeda (en el período invernal). Es evidente que en condiciones de radiación solar y climáticas más favorables (primavera-otoño y verano), aumentará la eficiencia al reducir el número de días necesarios para el secado. De todos modos, un ciclo de deshidratación como el expuesto, con aire algunos grados por encima de la temperatura ambiente durante el día y de reposo o circulación de aire más frío por la noche, presenta grandes ventajas desde el punto de vista de la conservación de los granos en general y de aquellos destinados a semillas en particular.

Dada la simplicidad de construcción de los colectores considerados en el presente trabajo, y de la relativa alta eficiencia en relación a su bajo costo, es de esperar que su aplicación práctica se desarrolle en el agro a breve plazo. Siguiendo el esquema de un trabajo previo sobre deshidratación de frutos /8/, los estudios a realizar en el futuro comprenden la determinación de la superficie colectora mínima, necesaria para lograr el secado de una determinada cantidad de granos y el estudio comparativo de un proceso de secado, en distintos períodos anuales y para diferentes granos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la amplia colaboración prestada por el personal técnico del Dto. de Física de la Facultad de Cs. Exactas e Ingeniería y del Campo Experimental Villarino y la Estación Agrometeorológica de la Facultad de Cs. Agrarias, U. N. de Rosario.

## Referencias

- /1/ W. H. Peterson y M. A. Hellickson, "Solar Electric Drying of Corn in South Dakota". Transactions of the A.S.A.E. (1976) y referencias contenidas en el mismo.
- /2/ G. Roa e I. C. Macedo, "Grain Drying in Stationary Bins with Solar Heated Air". Solar Energy, 18, 445 (1976).
- /3/ D. B. Brooker, F. W. Bakker-Arkewa y C. W. Hall, "Drying Cereal Grains".

The Avi Publishing Co., Westport, Conn., U.S.A. (1974).

/4/ R. Gaspar, M. A. Lara y R.D. Piacentini, "Ensayo, Modelización y Simulación de un Sistema Colector-Acumulador de Agua a Circulación Natural". Tercera Reunión de Trabajo A.S.A.D.E.S. Mendoza (Octubre 1977).

/5/ E. S. Crivelli, J. L. Guerrero y M. A. Pedregal, "Solar Radiation and Solar Energy in Argentina". Observatorio Nacional de Física Cósmica de San Miguel (C.N.E.G.H.), Publicación Interna E-24 (Circa 1973).

/6/ J.A. Duffie y W. A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processes". J. Wiley and Sons, New York (1974).

/7/ J. J. Elicabe Urriol, Comunicación Privada.

/8/ R. D. Piacentini y M. Combarrous, "Modelisation du Sechage de fruits". Revue Internationale d'Helio-technique C.O.M.P.L.E.S., 44 (Segundo Semestre de 1977).

## Apéndice

En la figura A.1 se detalla el esquema del circuito de adaptación de los sensores de temperatura al registrador /7/.

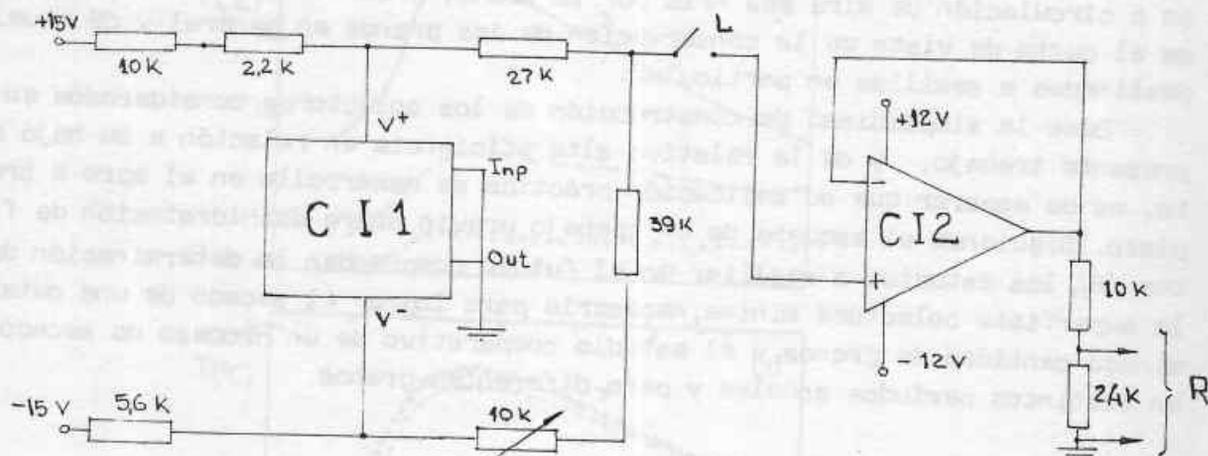


Figura A.1. Circuito de adaptación de sensores. CI1: Sensor de temperatura National LM 3511. CI2: Amplificador Operacional CA3140 (seguidor de tensión), L: Conmutador de sensor. R: Registrador.

Las características principales del sensor son: rango de operación entre -25 y 85 C, linealidad típica dentro del 0,5% y máxima del 2%, consumo de 7 mW y salida de  $10 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$ .