

ESTUDIO COMPARATIVO DEL SECADO SOLAR CON DISTINTOS GRANOS Y SISTEMAS*

A. Cortés⁺, R. Gaspar, M. A. Lara y R. D. Piacentini[#]

Grupo de Energía Solar, Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario, Avda. Pellegrini 250, 2000 Rosario

Resumen

Con el equipo de laboratorio dado en (1), se realizaron experiencias para otros sistemas de distribución del aire. En el silo de campaña descrito en (1) y (2), se redujo el área de colectores a $4,4 \text{ m}^2 \text{ t}^{-1}$. Se probó el sistema de piso perforado con soja y trigo, comparándose los resultados con los de campañas anteriores. Se presenta el esquema de una planta de procesamiento de granos, con aporte solar. Se discuten diversas alternativas de su diseño y los problemas inherentes a cada opción. En particular se encara una primera aproximación al tema de la adaptación de sistemas solares al tipo de silo más difundido en nuestro país. Finalmente se dan cálculos económicos preliminares, analizándose otras aplicaciones de la energía solar cantada.

1. Ensayos de laboratorio

Con el equipo de laboratorio descrito en (1), se realizaron experiencias adicionales destinadas a lograr una mejor información respecto de los campos de temperatura del aire que circula en una masa de granos. Los ensayos corresponden a $0,15 \text{ t}$ de soja ($M=13\%$) colocada en el silo. El aire de ingreso es regulado a 40 C , siendo el caudal seleccionado de $9 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$. Al comienzo de cada experiencia, la temperatura del grano es prácticamente la ambiente. Conectado el equipo se produce un transitorio que dura unas cuatro horas, al cabo del cual los registros prácticamente se estabilizan. Los datos mostrados corresponden al estado cuasiestacionario.

Las dos primeras experiencias son una continuación de las realizadas en (1). En la Fig. 1a se muestra el campo de temperaturas para un caño vertical como el ensayado anteriormente, pero parcial y uniformemente obturado en función de su altura. Si bien

* Trabajo parcialmente financiado con fondos del Programa Nacional de Energía No Convencional de la SECYT

⁺ Secario del CONICET

[#] Investigador del CONICET

se detecta una zona algo más fría en la parte central del caño, la distribución en altura es mucho más uniforme que en mediciones previas.

En la Fig. 1b se muestra el campo correspondiente al ensayo con piso perforado, observándose que prácticamente no existe dependencia radial al mejorarse la distribución del aire. Las distintas curvas muestran un fuerte gradiente en la zona inferior, que irá disminuyendo lentamente en el tiempo al elevarse la temperatura de las capas superiores del grano.

En la segunda serie de ensayos (Fig. 2) se tiende a lograr un campo puramente radial. En la Fig. 2a se ha utilizado también un caño perforado, pero con una distribución de obturaciones diferente, y en la Fig. 2b un caño tronco-cónico perforado. Se observa que, sobre todo en este último caso, se consigue el efecto buscado.

Finalmente se hicieron un par de experimentos con el objeto de observar el comportamiento simultáneo de caños y pisos, realizándose el ensayo con dos caños cónicos diferentes. Las curvas de la Fig. 3a muestran una pequeña contribución del piso, al haber utilizado un caño de altura relativamente grande. Reduciendo ésta (Fig. 3b), se nota la formación de un frente térmico que se desplaza hacia arriba y afuera. Si en lugar de un piso plano se hubiera trabajado con uno cónico, como se analiza en el ítem 3.5, habría habido un corrimiento hacia arriba de las isothermas en las zonas laterales, dada la mayor velocidad del aire en ese sector en comparación con el caso considerado.

2. Ensayos de campo

Con el sistema de campaña descrito anteriormente en (1) y (2), se realizaron mediciones complementarias. Las modificaciones efectuadas, previas a los ensayos, fueron:

- Sistema de introducción del aire por piso perforado, con agujeros de 3,5 mm de diámetro y 45% de área de perforaciones. El piso, paralelo a la tolva cónica, tiene una separación de 10 cm respecto de ésta.

- Reducción del área de colectores. De acuerdo a cálculos realizados en base a (3), se calculó el perfil de temperaturas para los caudales usados y para un valor típico de radiación. Los mismos muestran que, a los 3,6 m, el incremento de temperatura es el 70% del máximo, decreciendo rápidamente la eficiencia para mayores longitudes. Por ello, se emplea ese valor, lo que da una relación mínima de $3,7 \text{ m}^2 \text{ t}^{-1}$, correspondiente al silo totalmente lleno.

Se presentan dos de los experimentos realizados. En el primero, para una cantidad inicial de trigo de 0,84 t, se operó el sistema durante 3 días con un caudal de $4,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, lo que corresponde a $5,4 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$. En la Fig. 4 se muestran los

valores diarios de radiación y los registros de temperatura y humedad relativa ambiente y a la salida del grano, respectivamente.

En la Fig. 5 se dan los datos de humedad del grano, tomados diariamente a las 18 horas en cinco niveles de profundidad, en las zonas central y lateral. Se observa en ambos casos la formación de un frente de secado, siendo el proceso más rápido en la zona lateral, debido a la mayor velocidad aparente del aire, como se indica más adelante. Para el sector central el ritmo de secado es del orden de 0,35 por ciento por día, mientras que para la zona lateral es de 0,45 por ciento por día. Obviamente, toda esta última región se encontrará seca antes que en la zona media superior se haya llegado al valor requerido para la conservación de los granos.

En las capas superiores centrales se observa, en los primeros días, un incremento de la humedad del grano. Esto se debe probablemente a la condensación de una fracción de la humedad removida en los primeros tramos, conformando una especie de "frente de condensación", que se va elevando y desaparece al cabo del tercer día. En la periferia no se observó este fenómeno, por la mayor velocidad del secado.

En la Fig. 6 se han aproximado las curvas obtenidas para esta región con las que resultan de la ecuación semi-empírica:

$$W = 2^{\alpha D} \cdot (W_0 - W_e) / (2^{\alpha D} + 2^Y - 1) + W_e \quad (1)$$

que es una modificación de la dada en (4), por la inclusión de un coeficiente α . W es la humedad del grano, W_0 su humedad inicial y W_e el valor de equilibrio con el aire a las condiciones medias de entrada. D es un "factor de profundidad" que da la localización del grano considerado, Y un número adimensional directamente proporcional al tiempo y α un coeficiente de ajuste. La Ec. (1) para $\alpha=1$ describe el secado en lechos profundos con base plana en condiciones constantes del aire de entrada.

Para soja (masa inicial 640 Kg, humedad 17,2% y caudal $5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$) se dan los valores de radiación, humedad ambiente y temperatura en la Fig. 7 y los de W en la Fig. 8, éstos según datos tomados a las 9 y 18 horas. Para la parte central la reducción es de $0,43 \text{ \%} \cdot \text{día}^{-1}$ y para la lateral de $0,72 \text{ \%} \cdot \text{día}^{-1}$. En la Fig. 9 se comparan los datos de W con los de 1979. Para este último caso, pese a tener mayor área de colección el proceso es más lento.

3. Planta de procesamiento de granos

Si bien las experiencias realizadas en campo con el silo de 1 t han sido valiosas, se considera que es necesario reali-

zar ensayos con equipos de mayor envergadura. Para ello se encuentran en proyecto dos instalaciones. La primera consta de un silo de 10 t con mecanismos de carga y descarga. El aporte solar se logra con un banco de colectores simples de 40 m². Por su importancia, nos referiremos en extenso al segundo de los proyectos en desarrollo.

El mismo corresponde a una planta de procesamiento y almacenamiento de granos para semilla y consumo, a ser instalada en el Campo Experimental Villarino (Zavalla, Santa Fe). Participan además en el desarrollo la Facultad de Ciencias Agrarias y el Departamento de Proyectos de la Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, ambos de la U.N.R.

En el esquema del diseño se da en la Fig. 10. Como se observa, se ha previsto el aporte solar para el secado de una parte de los granos. Se aprovechará la energía captada fuera del período de secado en otras aplicaciones (tales como invernaderos, climatización, secado de forrajes, etc.).

La concreción de este proyecto permitirá:

- a) Ensayar por vez primera a escala operativa el secado solar de granos en la Pampa Húmeda, región ésta que tiene la mayor producción de granos del país y el máximo consumo energético para secarlo.
- b) Mejorar la calidad final del grano, al reducirse la temperatura de secado y eliminarse la contaminación introducida en el producto por los gases de combustión. Esto último se logrará con el funcionamiento solar puro ó, en las secadoras convencionales, adosando a las mismas intercambiadores de calor.
- c) Promover la formación de profesionales universitarios con conocimientos sobre la operación y manejo de plantas de procesamiento solar y convencional de granos. Se ha detectado en la actualidad un severo déficit en esta especialidad.
- d) Desde el punto de vista económico, manejar integralmente el cereal por parte de la Universidad, hasta su comercialización.

El diseño de la planta presenta, desde el punto de vista solar, varios aspectos de interés, tales como: el diseño de un banco de colectores solares, su interconexión con el sistema y la operación del conjunto. Se proponen dos alternativas:

- a) La utilización de un banco de colectores solares como precalentadores del aire que ingresa a una secadora convencional de alta velocidad (varias toneladas de granos por hora), con el fin de reducir su consumo de combustible.

b) El secado en silo con aire natural o calentado solamente unos pocos grados por encima de la temperatura ambiente. En este caso el proceso se extiende por días o aún semanas.

3.2. El uso de colectores solares conectados a una secadora convencional

Se pueden utilizar colectores solares simples (3), (5) o bien de tipo más elaborado como los dados en (6). En la Tabla I se comparan los aportes solares para una secadora continua de rendimiento nominal igual a 20 t h^{-1} pero haciéndola operar para semillas ($T_{\text{máxima}} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$). Los cálculos se han hecho para el mes de mayo y con un caudal de $710 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$.

Tipo de Colectores	Costo (u\$s/ m^2)	Area (m^2)	Eficiencia (%)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	Aporte solar (%)	Amortización (años)
Simples	26	430	0,28	3	14	14
Simples	26	1420	0,14	5	23	28
Matriz porosa	30	300	0,69	5	29	19
Matriz porosa	30	1060	0,59	15	34	22

TABLA I. Comparación de cuatro alternativas de un banco de colectores solares acoplado a una secadora convencional.

Los costos se dan a valores de prototipo y sin desgravación o subsidio. Los períodos de amortización se calculan en función del sólo ahorro de combustible (tomado a valores actuales).

A medida que aumenta el porcentaje de aporte solar, aparecen vientos diarios y estacionales que superan la temperatura máxima permitida. Ello se puede obviar eliminando parte de la superficie captora ó, más racionalmente, recurriendo al uso de acumuladores de mediana capacidad. Los mismos permiten extender el tiempo de utilización del sistema solar, pero encarecen el costo total y aumentan los plazos de amortización. En general, de mantenerse la actual estructura de costos la alternativa aquí considerada no parece atractiva para el productor, dados los plazos de amortización excesivamente largos.

3.3. Secado solar en silos

El secado en silos con aire a baja temperatura es una técnica de interés por su simplicidad de adaptación al régimen solar. Sin embargo, presenta dificultades inherentes al proceso de secado en sí.

Al hacer pasar aire a través de una masa de granos, se forman

tres regiones características, a saber:

- a) Una primer región donde el grano se encuentra en equilibrio termodinámico con el aire exterior (zona seca).
- b) Una segunda, en la cual el grano, con una temperatura próxima a la del aire exterior, disminuye su humedad con el tiempo (zona de secado).
- c) Una tercera, donde el grano, conservando su humedad inicial, toma una temperatura próxima a la del aire circulante (zona húmeda).

Lo que se trata de obtener con el secado artificial es que la humedad del grano se reduzca al valor requerido para su conservación a largo plazo, antes de que se produzca su deterioro. En el caso de semillas, esto último se da por la pérdida de su poder germinativo, mientras que en granos para consumo lo es por la reducción de su grado comercial.

A lo largo del proceso, la zona de secado se va desplazando en el sentido del movimiento del aire, ensanchándose la parte seca y reduciéndose la húmeda. Esto se verifica aún en regiones de humedad ambiente elevada. Por ejemplo, considerando para la región agrícola de Rosario valores típicos correspondientes al período de recolección de la soja (mes de mayo, temperatura ambiente diurna de $15,5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa diurna de 65%) se tiene que para este producto la humedad de equilibrio (en base húmeda) es de 13,4%. Este valor es muy próximo al requerido para la conservación del grano. No obstante, salvo para espesores muy pequeños de la masa de granos o para caudales excesivamente altos, se producirá deterioro antes de completarse el secado.

Este proceso puede acelerarse calentando ligeramente el aire (en el caso anterior es suficiente llevarlo a $19,5^{\circ}\text{C}$). Si bien esto asegura la calidad del producto final, trae aparejado otro problema: el sobresecado. Así, con los datos previos la humedad de equilibrio del grano es de sólo 8,3%, valor demasiado bajo, pues reduce su valor final o su poder germinativo. Con el fin de solucionar este problema se recomienda en general renovar el grano mecánicamente, invertir el flujo de aire o recircular parte del aire de salida(7).

3.4. Secado en silo con movimiento radial del aire

Teniendo en cuenta los resultados satisfactorios obtenidos en la homogeneización del aire con el sistema de laboratorio, se analizó la posibilidad de extender el esquema allí utilizado a sistemas de mayor capacidad. Se consideró particularmente el tipo de silo denominado " danés", que posee un caño central perforado y salidas laterales del aire. El mismo se utiliza habitualmente para la conservación, mediante la

aireación. En principio se encontraron dos limitaciones básicas:

- a) Al tenerse una distribución radial de velocidades, su valor máximo se encuentra a la salida del caño. Como existe un tope para esta magnitud (a fin de evitar canalizaciones), deberá aumentarse el diámetro de dicho conducto, con el consecuente incremento de los costos.

- b) La zona seca debe llegar a las canas externas en un tiempo suficiente como para evitar el deterioro del grano, debiendo en general emplearse caudales altos. No obstante, es en dichas zonas donde el aire se desplaza más lentamente, lo que reduce la rapidez del proceso.

No se ha encontrado en la literatura un análisis detallado de este aspecto, por lo que se realizarán las correspondientes simulaciones con los modelos usuales (como los dados en (8) y (9)), pero adaptados a la nueva estructura del flujo de aire. Existen en cambio ensayos parciales de un silo radial (10), donde se ha observado que, operando para secado, las pérdidas de carga son importantes. Esto quizás no se deba a un problema estructural sino más bien a que el equipo ensayado, originalmente construido para aireación, fue operado con caudales mucho mayores (como son los requeridos en secado). De todos modos, la estructura radial presenta ventajas e inconvenientes, que se mencionan a continuación:

a) Ventajas:

- Posibilidad de reducir el diámetro externo del silo, disminuyendo así los costos de fundación.
- Reducción de la pérdida de carga, pudiéndose utilizar eventualmente ventiladores axiales.
- Posibilidad de reducir el sobresecado.

Una vez que el valor medio de la humedad es el adecuado, un trasilado mezcla los granos secos y húmedos. Una aireación final, o simples procesos naturales de transferencia, uniformizan la humedad del producto.

b) Inconvenientes:

- Mayor costo del sistema de aireación y mayores pérdidas en los conductos de distribución del aire.
- Mayor costo del silo, dado que éste tiene mayor relación área-volumen que los otros diseños.
- Necesidad de proteger las partes laterales del grano contra acciones atmosféricas.

Finalmente, de optarse por el sistema originalmente planteado de varios caños verticales perforados, el análisis es mucho más complejo, por cuanto debe resolverse en primera instancia el problema del movimiento del aire (en tres dimensiones) y además adiantar, a la estructura espacial, los modelos de secado habituales. De todas maneras, estudios preliminares indican que la zona inferior recibirá menos caudal que las superiores y que las pérdidas de carga aumentarán, dada la estructura del campo de velocidades.

3.5 Secado en silo con movimiento vertical del aire

La mayoría de las experiencias y datos sobre secado solar de granos en el exterior (principalmente en Estados Unidos), se dan para el secado en silos contenedores con base plana de chapa perforada. En estos silos, de capacidades típicas de 100 t, el proceso de secado (natural, con aporte de energía convencional o solar), se extiende por períodos largos. El grano, una vez seco, se retiene en el silo durante varios meses y frecuentemente por más de un año, por ser el acopio económicamente rentable. En la Argentina, en cambio, el productor en general prefiere remitir el grano húmedo a los acopiadores o cooperativas, transfiriendo el problema del secado a las mismas. Aún logrando que el acondicionamiento del grano se efectúe en silos de campaña, es de esperar que, por algún tiempo aún, el acopio se haga por períodos cortos. El sistema proyectado debe poseer, por lo tanto un mecanismo de descarga sencillo.

La solución adoptada masivamente para las plantas de campaña es la descarga por tolva cónica, donde la extracción se efectúa por la sola acción gravitatoria. Si se desea en un silo de tal característica un secado por piso perforado, existen dos soluciones:

- a) Colocar un piso plano falso durante el secado,
- b) Colocar el piso perforado paralelo a la tolva, creando un plenum de pequeño volumen.

La primera alternativa involucra el uso de sistemas adicionales para extraer la parte inferior del grano. La última implica un aumento de la potencia requerida para el movimiento del aire. Deberán realizarse cómputos económicos más precisos para optar por una u otra de dichas alternativas.

Para ejemplificar el problema del aumento de potencia mecánica se compara el secado en dos silos, uno con tolva cónica a 30° y relación entre altura y diámetro de 0,6 y otro plano de igual altura máxima, ambos de 50 t de capacidad ($71,43 \text{ m}^3$), cuyas medidas se indican en la Fig. 11. El dimensionamiento se realiza para soja, con una humedad inicial del 10% (base húmeda). El caudal necesario depende del uso posterior del grano, de su humedad inicial y de su temperatura promedio. Si se asume una temperatura media del grano de 22 C (1) y un uso para semilla del mismo, en (11) se indica un caudal mínimo por unidad de masa del cereal $Q/M = 3,75 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$.

La pérdida de carga a lo largo del total de la masa de granos es constante e igual a la diferencia de presión entre la del plenum y la atmosférica. En el silo con tolva cónica, esto implica una mayor pérdida de carga por unidad de altura del lecho de granos en el región lateral respecto del centro y por lo tanto una velocidad aparente (Caudal/sección) del aire menor para la zona central. Por lo tanto será para esta zona, la menos favorecida, que habrá que proveer una ventilación no inferior al mínimo valor de

Q/M arriba consignado.

Empleando las curvas dadas por (4), de velocidad aparente en función de la pérdida de carga por unidad de altura, se obtiene $\Delta p = 71$ mm de agua. Además se comprueba numéricamente que para los valores presentados, se puede realizar un buen ajuste lineal de la velocidad aparente en función del radio, resultando:

$$\frac{dQ}{dA} = 9,14 + 1,43 r \quad (2)$$

donde dQ/dA tiene unidades de $m s^{-1}$ y r de m . El caudal total Q_T se obtiene integrando sobre toda la sección del silo. Para el silo cónico Q_T es igual a $346 m^3 min^{-1}$. Para el silo plano en cambio, $Q_T = 188 m^3 min^{-1}$, con igual Δp .

Las curvas características de ventiladores centrífugos de uso común muestran que en el primer caso el consumo es de 12 HP y en el segundo de 5 HP. Una diferencia de 7 HP es considerable, e influye marcadamente en los costos de instalación y operación del sistema.

5. Análisis económico de la planta (parte de secado)

El problema básico que se presenta al realizar cálculos de costos de secado de granos es que el período de utilización es corto. En plantas intermedias (con una capacidad de unas 3000 t), el uso efectivo oscila en alrededor de un 20% del máximo posible. A nivel de productores, ese nivel puede quizás aumentarse algo con un adecuado manejo del grano en campo y previo al secado. Aún así, todo incremento del costo de instalación redundará en un mayor costo global del proceso. En particular, cuando es factible la simple aireación del producto (en zonas relativamente frías y no muy húmedas), ese es el proceso económicamente más conveniente. En regiones de clima templado y húmedo es donde la alternativa solar aparece más ventajosa que la aireación, aunque menos que el secado convencional en silo con aporte extra (12).

A continuación se dan los costos de un silo con aporte solar de 50 t con los siguientes datos:

- Area de $4 m^2 t^{-1}$. Para el mes de mayo esto produce, para un caudal de $3,5 m^3 min^{-1} t^{-1}$ un aumento medio de 4 C, suficiente para el secado en silo. Se requiere un ventilador de 10 HP.
- Ejemplar total de los colectores al cabo de 15 años.
- Reducción media de la humedad del grano de 0,5 por ciento por día.

En promedio se espera acondicionar el grano en 12 días, en los períodos: noviembre-diciembre, febrero-mayo, abril-mayo y mayo-junio, es decir procesar 250 t/año.

Los costos del banco de colectores son de 26 u\$s/m² y el del ventilador 2500 u\$s, lo que da un total de 7700 u\$s. Considerando un consumo eléctrico de 662 u\$s al año, el costo total es de 1175 u\$s/año, o bien 4,7 u\$s/t.

La planta incluye una secadora convencional de columna, de rendimiento nominal de 10 t/h, con un motor de 30 HP. Su consumo de gas-oil es de 35 lt/h y su rendimiento para semilla de 3 t/h. El costo actual de ese equipo es de 37000 u\$s. Para procesar 250 t/año el costo de la energía eléctrica es de 840 u\$s y el de gas-oil 275 u\$s, es decir 1115 u\$s/año. Si se asume que el costo de la secadora se amortiza en 30 años, el costo total anual es de 2350 u\$s. No obstante, debe tenerse en cuenta que en el lapso de 60 días, la secadora puede procesar un total de 4320 t. El costo a afectarse para las 250 t suponiendo el uso extendido es de sólo 156 u\$s, por lo que el costo efectivo convencional sería de 1251 u\$s/año, un 6% mayor que el solar. Además, el proceso solar significa un ahorro de energía final de 455 u\$s/año.

Finalmente corresponde computar el costo de la energía solar. Se producen 13,6 kWh/h con un gasto de 1,104 u\$s/h. Ello significa un costo de 0,08 u\$s/kWh. Esto es un 54% del costo eléctrico, pero el triple del valor de la energía producida por quemado directo.

6. Conclusiones y perspectivas futuras

El presente trabajo abarca un amplio espectro del problema del secado solar de granos: el estudio en prototipo de laboratorio de los sistemas de aireación, la experimentación en campo con distintos granos y sistemas, el ajuste empírico del secado (solar) en régimen variable, el proyecto de una planta de silos con aporte solar, así como el análisis de costos correspondiente.

Los resultados obtenidos muestran que es factible proceder al secado solar de granos a escala industrial y semiindustrial (fundamentalmente los destinados a semillas), en una región de clima templado-cálido y húmedo. Cabe destacarse que los costos han sido calculados con los criterios usuales, sin incluir análisis más elaborados como los que consideran la energía base de los combustibles y materiales. En este último caso es previsible la obtención de una relación más favorable para la alternativa solar.

Los estudios futuros se centrarán en:

-Simulación teórica del secado solar de granos de mayor producción en la zona de la Pampa Húmeda.

-Análisis experimental en el prototipo de laboratorio del proceso de secado solar a ser simulado a los efectos de identificar parámetros.

-Ampliar el estudio del secado a escala semiindustrial e industrial tanto en lo concerniente a la planta de silos en sí, como al banco de colectores solares.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los directivos de la Fundación Ciencias Agrarias del Campo Experimental Villarino de la UNR, como así también al personal del Departamento de Proyectos de la Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería (UNR), al Ing. J. Hack (Molinos Pénix), a A. Sessolari y M. Bernardini por su colaboración en la realización técnica del presente trabajo. El fructífero intercambio de ideas con los Dres. G. Roa Mejía y L. Saravia durante su estada en Rosario es altamente apreciada.

Referencias

- 1 M.A. Lara, A. Cortés, R. Gaspar y R.D. Piacentini. "Secado Solar de Maíz y Soja". A publicarse en Actas de la V Reunión de Trabajo de A.S.A.D.E.S. (Córdoba, 1979).
- 2 M.A. Lara, A. Cortés, R. Gaspar y R.D. Piacentini. "Secado Solar de Granos". Actas de la IV Reunión de Trabajo de A.S.A.D.E.S. (La Plata, 1978).
- 3 A. Cortés y R.D. Piacentini. "Colectores Solares de Aire de Diseño Simple". A publicarse en Actas de la V Reunión de Trabajo de A.S.A.D.E.S. (Córdoba, 1979).
- 4 D.B. Brooker, F.W. Bakker-Arkema y C.W. Hall. "Drying Cereal Grains". The Avi Press Co, Westport, Connecticut (1974).
- 5 A. Cortés. "Ensayo y Modelización de Colectores Solares de Aire de Diseño Simple". Trabajo Especial para la Carrera de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería de la UNR (1979).
- 6 L. Saravia, E. Frigerio, J. Pérez, I. De Paul, M. Gay, J.A. Arias y D. Fernández de Ullivarri. "Proyecto y Ensayo de Componentes de un Secadero Solar de Tabaco Virginia". A publicarse en Actas de la V Reunión de Trabajo de A.S.A.D.E.S. (Córdoba, 1979).
- 7 R.O. Pierce y T.L. Thompson. "Management of Solar and Low-temperature Grain Drying Systems. Part II: Layer Drying and Solution to the Overdrying Problem". A.S.A.E. Winter Meeting (Chicago, 1978).
- 8 T.L. Thompson, R.M. Peart and G.H. Foster. "Mathematical Simulation of corn Drying-a new model". Transactions of the A.S.A.E. 71, 4, 562 - 586 (1968).
9. J.M. Troeger & W. V. Hukill. "Mathematical description of the drying rate of fully exposed corn." Trans. ASAE 14(6):1153(1971)
10. M. Mattion & G. Roa. "Estudo comparativo da secagem de sementes da soja em silos verticais com distribuição radial de ar utilizando aquecimento solar e ventilação natural. VII Congresso de Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. Pelotas, RS, 1977.
11. L.G. Villa, G. Roa, I.C. Macedo. "Minimum airflow for drying

soybean seeds in bins with ambient and solar heated air. ASAE Technical Paper 78-3017 (1978).

12. R. G. Pierce & T. L. Thompson. "Management of solar and low temperature grain drying systems. Part I: Minimum airflow rates. Supplemental heat and fan operation strategies with full bin. ASAE Technical Paper 78-3513 (1978).

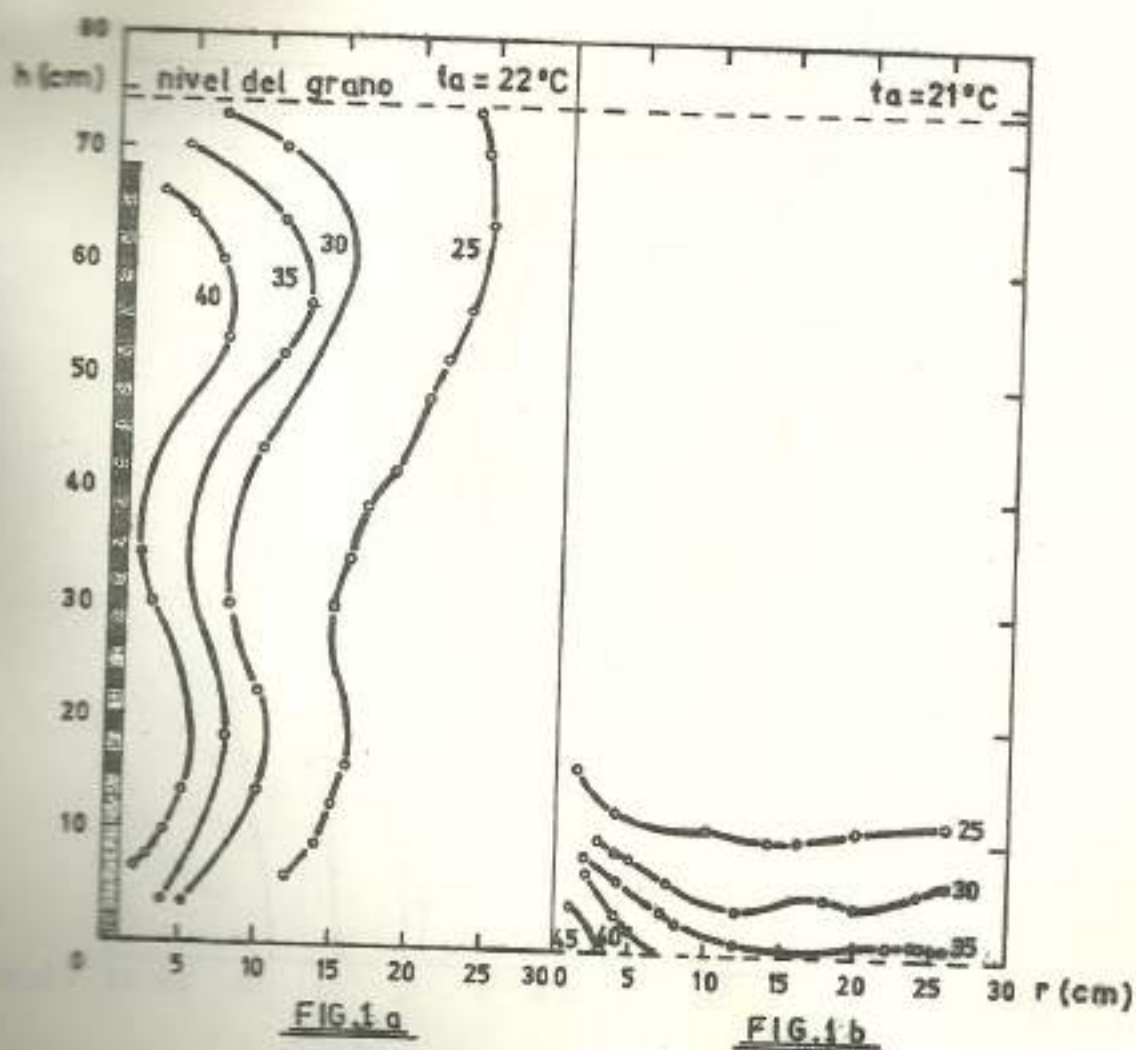


Figura 1: Perfiles de temperaturas obtenidos en el prototipo de laboratorio. En Fig. 1 a : tubo vertical uniformemente obturado; en Fig. 1 b: tubo perforado.

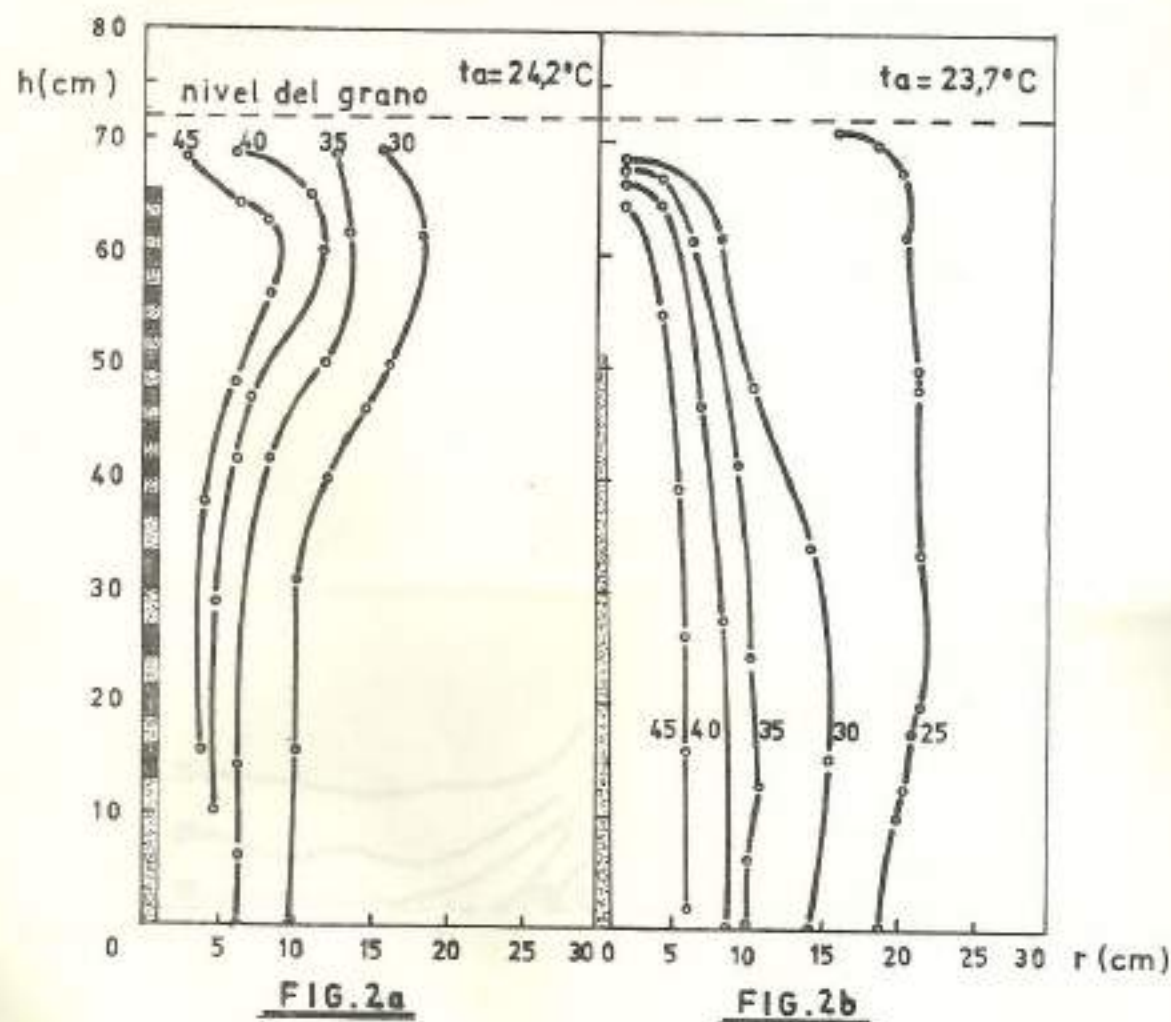


Figura 2: Perfiles de temperaturas obtenidos en el prototipo de laboratorio. En Fig. 2 a) caso cilíndrico vertical con obturación uniforme; en Fig. 2 b) caso tronco cónico vertical.

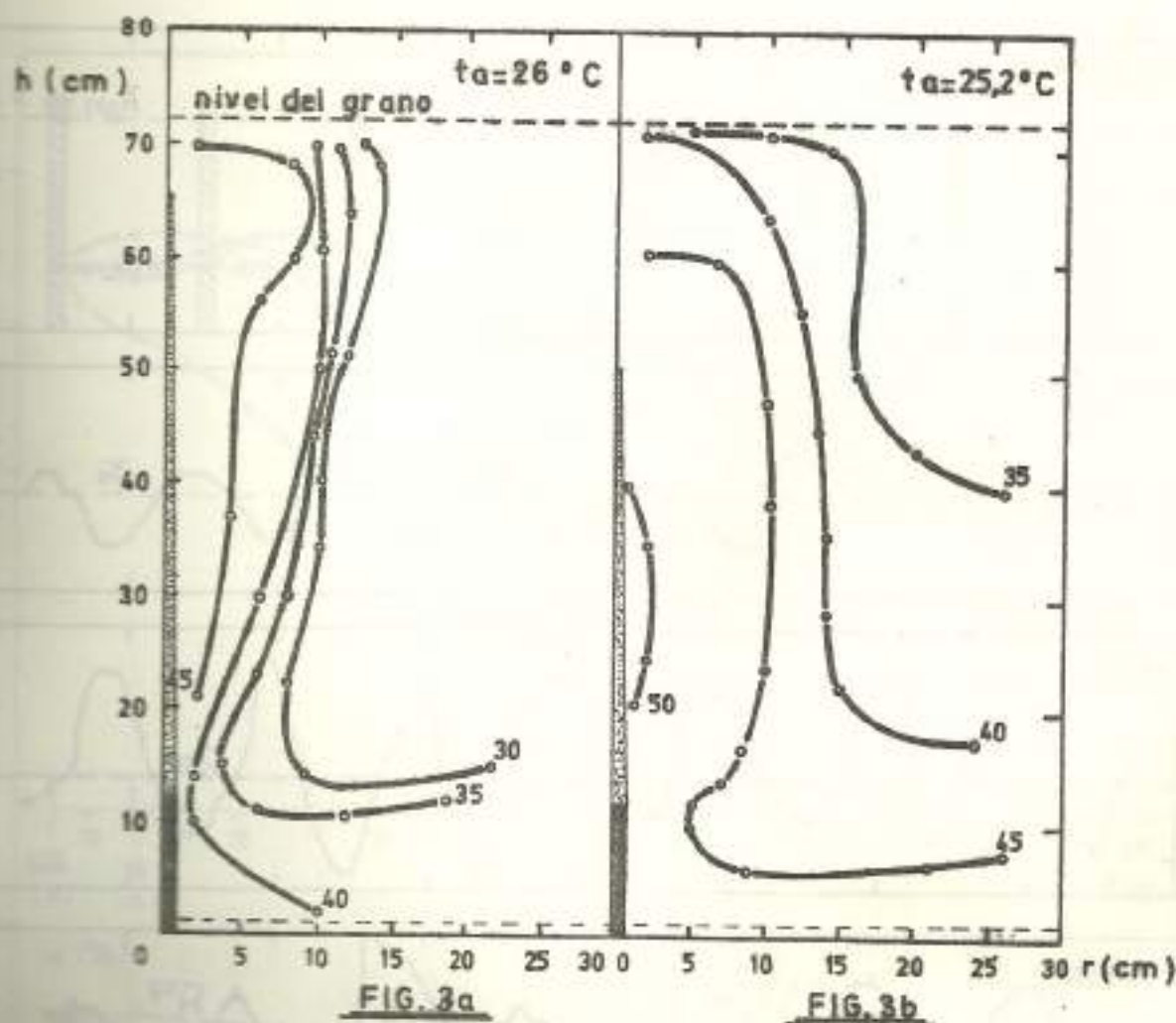


Figura 3: Perfiles de temperaturas obtenidos en el prototipo de laboratorio. En Fig. 3 a: Piso perforado y caño tronco-cónico de 0,65 m de altura. En Fig. 3 b: Piso perforado y caño tronco-cónico de 0,50 m de altura.

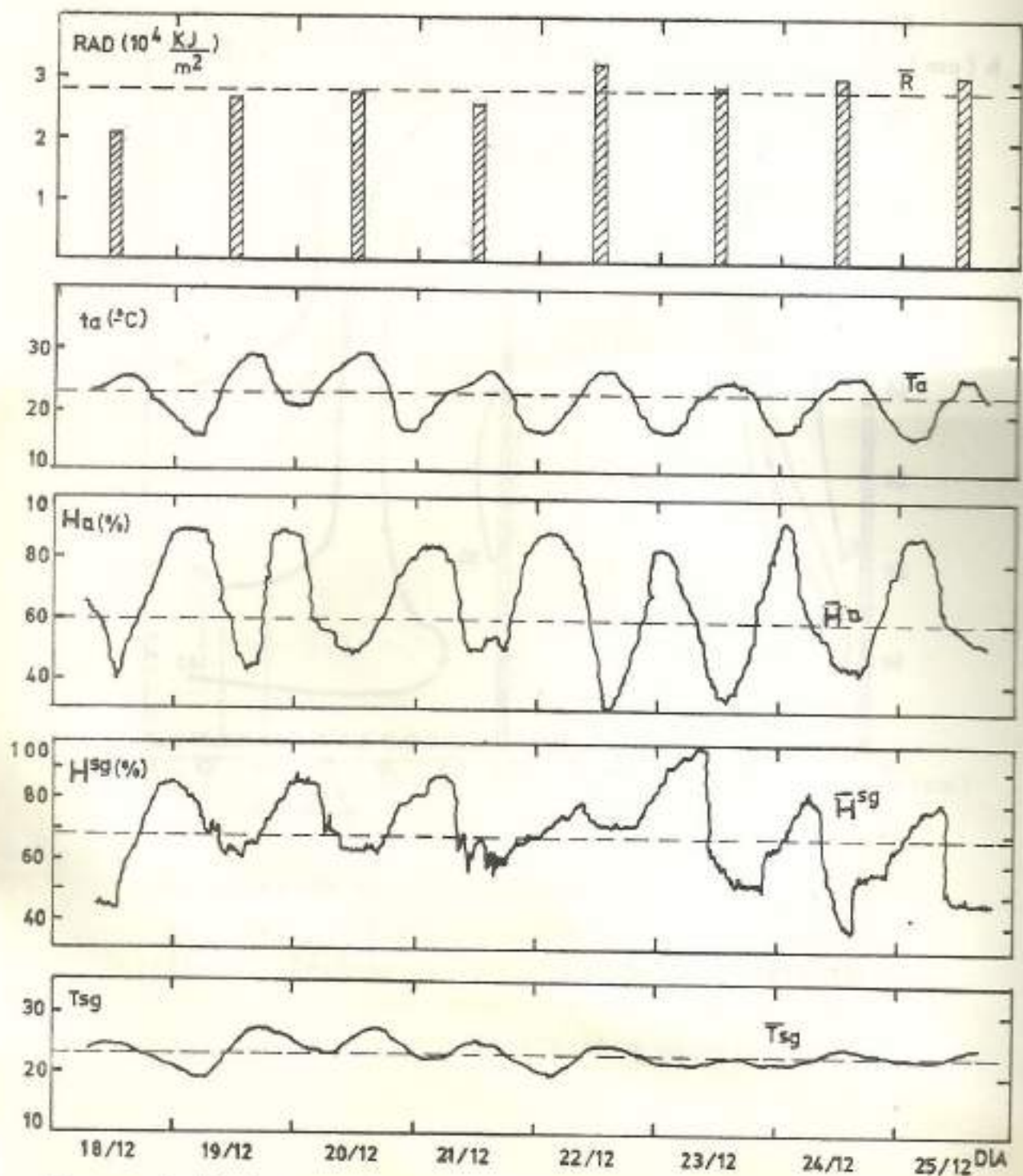


Figura 4: Registros de: radiación solar sobre el plano horizontal; temperatura y humedad relativa ambientes y temperatura y humedad relativa a la salida del grano correspondientes al ensayo de secado de trigo.

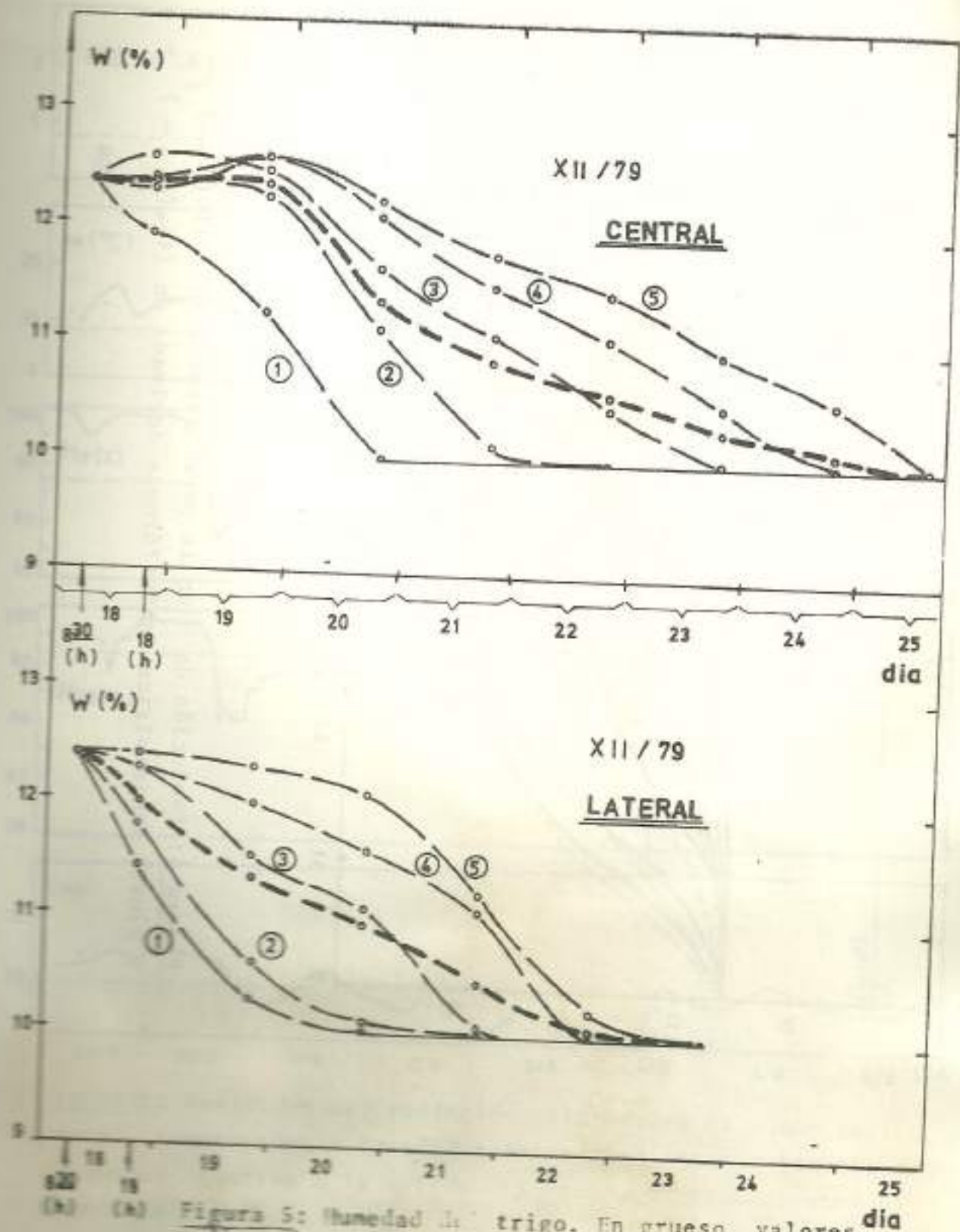


Figura 5: Humedad de trigo. En nuevo, valores medios. Los números indican altura creciente.

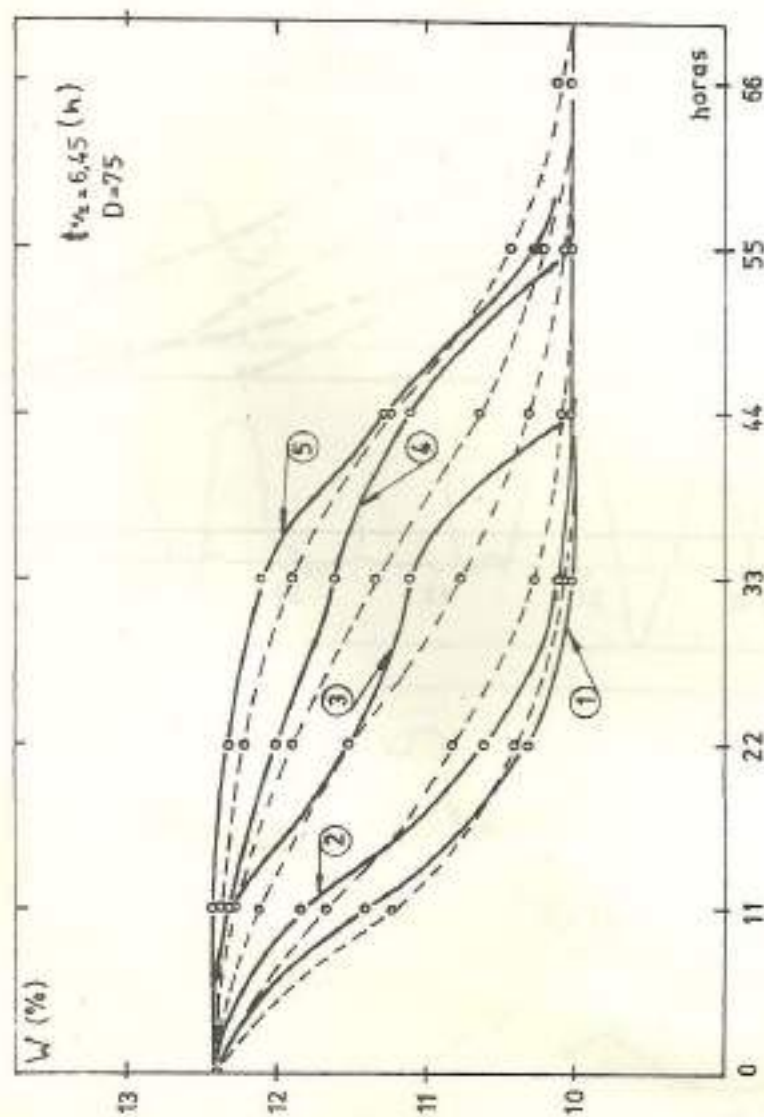


Figura 6: Evolución de W en la parte lateral del silo (—) y ajuste semiempírico según fórmula derivada de (4) (- - -)

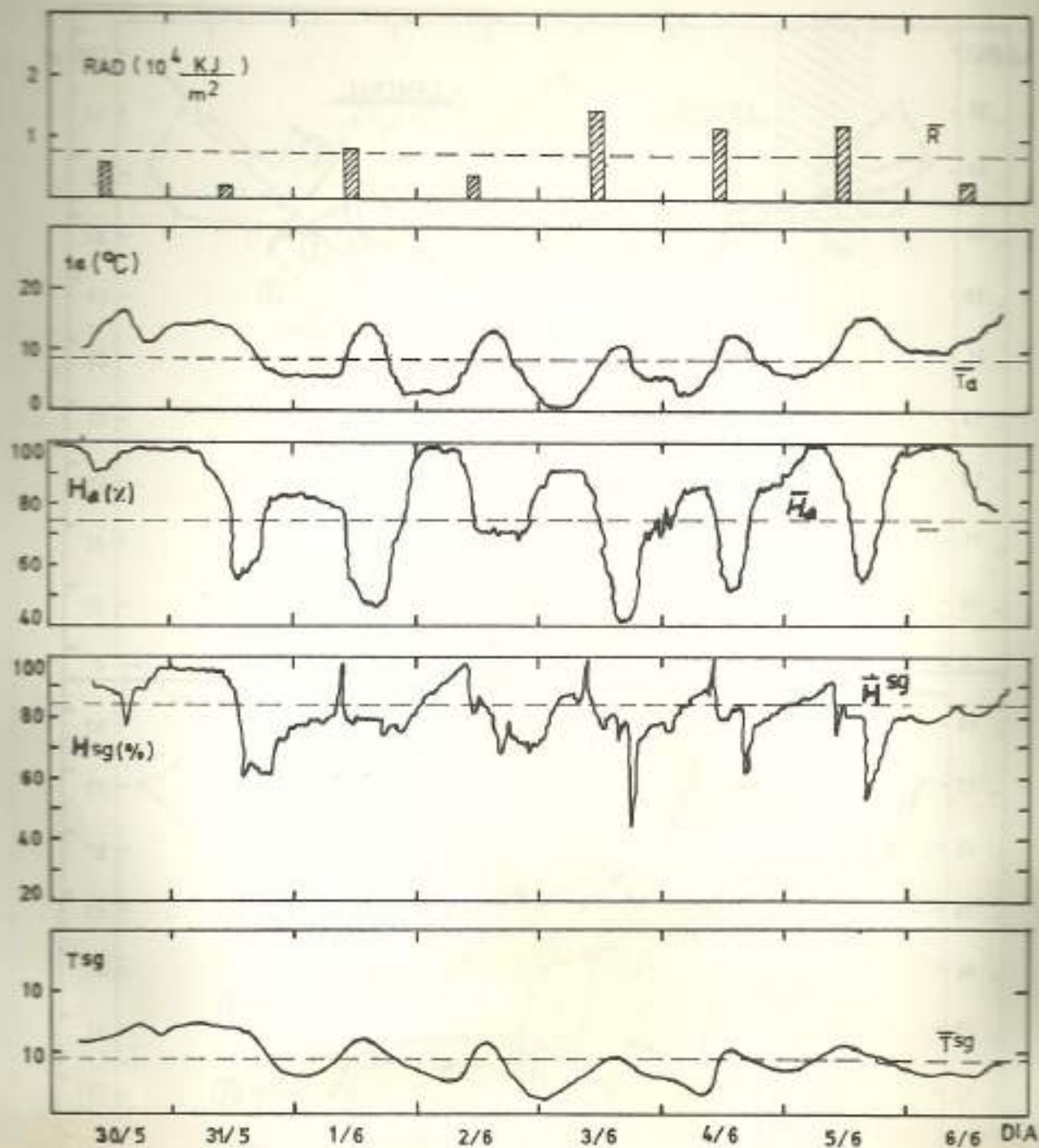


Figura 7: Registros de: radiación solar sobre el plano horizontal; temperatura y humedad relativa ambientes y temperatura y humedad relativa a la salida del grano correspondientes al ensayo de secado de soja.

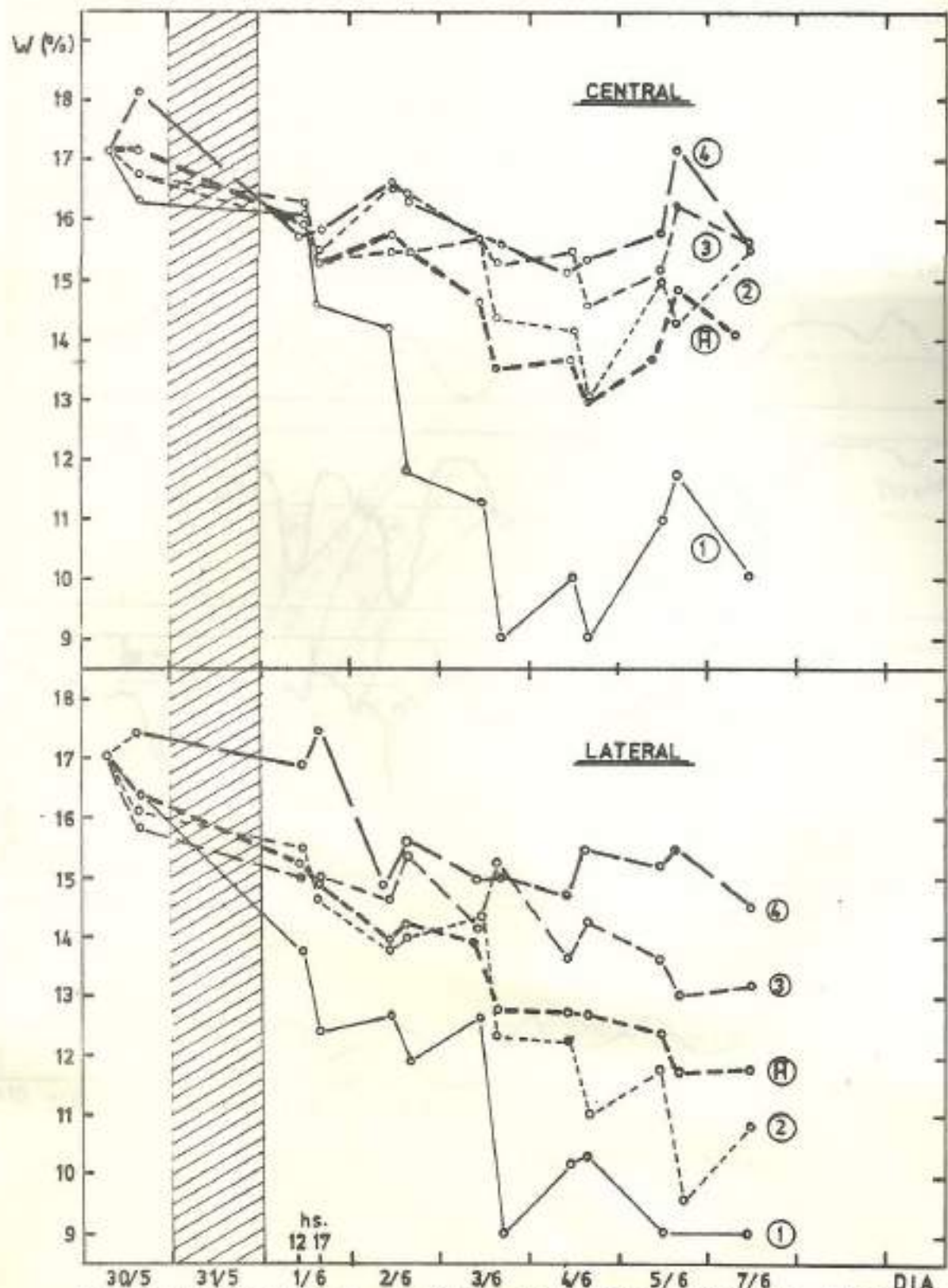


Figura 8: Humedad de la soja. Los números indican altura creciente y los trazos gruesos valores medios. El día 31/5 el sistema no se operó por lluvia.

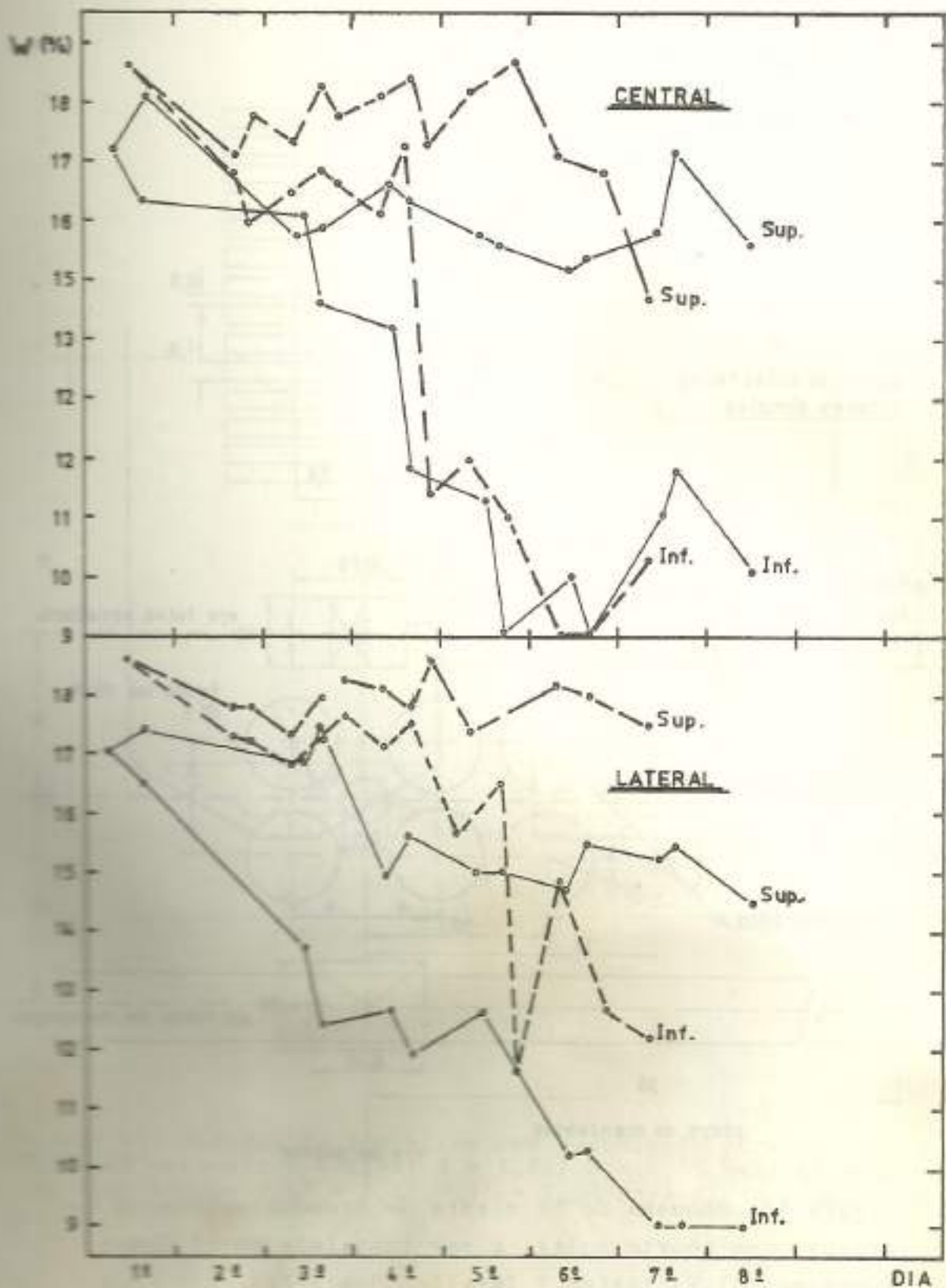


Figura 9: Comparación del secado de soja, campañas 1970 (---) para caños y 1980 (—) para niso.

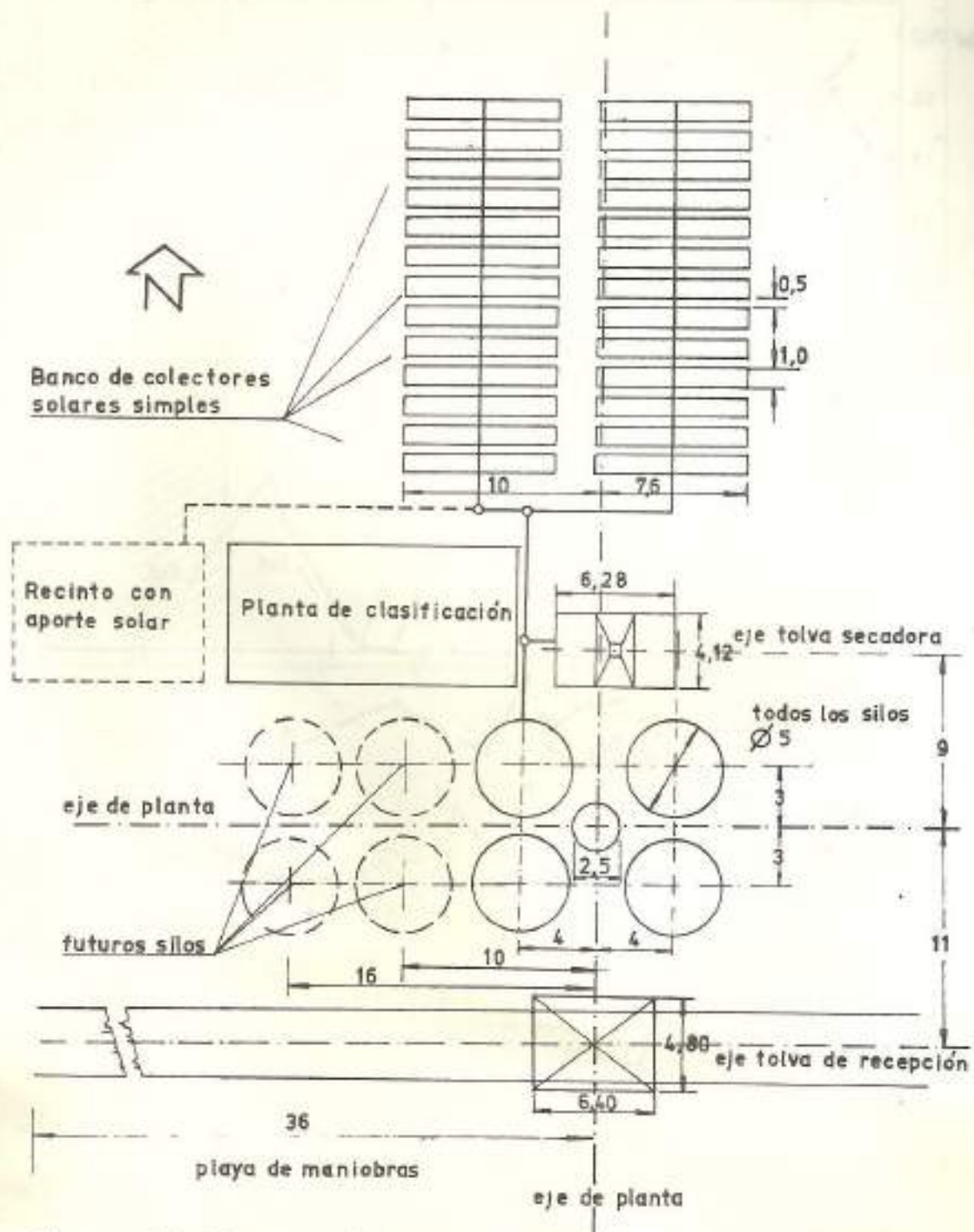


Figura 10: Esquema de la planta de acondicionamiento de granos, con aporte solar, a ser instalada en el Campo Experimental Villarino (Zavalla, Santa Fe).

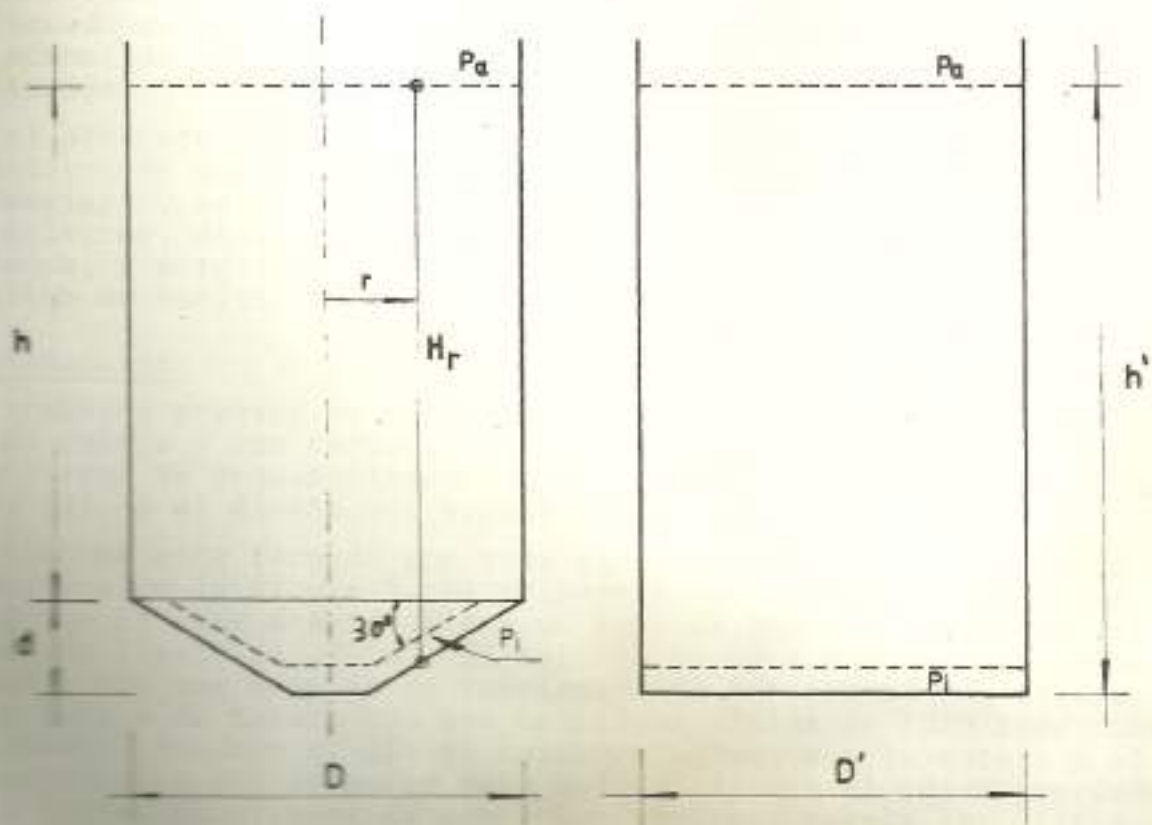


Figura 11: Medidas de los silos con movimiento vertical comparados (en metros): $h = 1,83$; $d = 1,75$; $D = 6,05$ para el silo con piso cónico y $h' = 3,63$ y $D' = 5,00$ para el de base plana.