

# SECADOR SOLAR SEMI - INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGRICOLAS: RESULTADOS EXPERIMENTALES\*

A. Iriarte<sup>o</sup> y V. García  
INENCO Catamarca #  
Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa.  
Mtro. Quiroga N° 93 - 4700 - Catamarca

L. Saravia  
INENCO, Salta - UNSa.  
Buenos Aires N° 177 - 4400 Salta

## RESUMEN

En el presente trabajo se describe un nuevo diseño para la transformación de un invernadero en un colector solar y un secador de productos agrícolas.

Se analiza el comportamiento térmico, determinándose experimental y teóricamente los parámetros característicos de diseño y de funcionamiento del colector solar, de la calefacción auxiliar y del túnel de secado. Los resultados obtenidos se comparan con el diseño anterior y se analiza un ensayo de secado de romero.

## 1.- INTRODUCCION

La necesidad de implementar nuevas formas de producción e integrar los sistemas de secado solar a infraestructuras existentes, con el fin de bajar los costos y rentabilizar el deshidratado de los mismos, nos ha impulsado al estudio del comportamiento térmico de los invernaderos como estructuras soporte para la provisión de energía térmica de esta actividad.

En un trabajo anterior (1) se han analizado las condiciones y características técnicas de uso de un invernadero como colector solar mediante la construcción, en el interior del mismo, de una cámara de medición y ensayo. Los datos obtenidos permitieron determinar el comportamiento general del invernadero transformado en un colector solar y evaluar la contribución de la calefacción auxiliar al funcionamiento del sistema, así como realizar un ensayo de secado de uva sin semilla variedad CG102-011.

Del análisis de los resultados experimentales se concluyó que era necesario aumentar el coeficiente de transferencia de calor entre el horno y el aire circundante, mejorar la distribución del calor producido, garantizando que sea aportado directamente al aire que ingresa a la cámara de secado, disminuir las pérdidas de calor por el techo del invernadero y proteger los plásticos en la proximidad del horno.

En consecuencia, para resolver los problemas planteados se ha sustituido la cámara por un túnel de secado y se ha incorporado un recinto o cámara para el manejo y control de la calefacción auxiliar.

\* Miembro de Carrera del CONICET

# Convenio UNCa - UNSa - CONICET

\* Parcialmente financiado por:  
INENCO - BID CONICET N° 307  
SEDECyT - UNCa

En el presente trabajo se analiza la nueva configuración para la transformación de un invernadero en un colector solar y secador, el movimiento del producto, el sistema auxiliar de calentamiento y un análisis de los resultados experimentales.

Las mediciones se realizaron sobre cada componente del sistema bajo diferentes condiciones, lo que permitió realizar un balance energético. Se analizan los parámetros característicos  $U_L$ ,  $F'$ ,  $F_R$ , radiación externa, temperaturas de colector, cantidad de calor útil y rendimiento del colector, comparándose estos resultados con los diseños anteriores. En lo que respecta al sistema de calentamiento auxiliar se determina la eficiencia de los hornos y la cantidad de calor transferido. Se muestran los resultados de un ensayo de romero.

## 2.- DESCRIPCION DEL PROTOTIPO

El módulo utilizado para este ensayo está ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria del INTA, Sumalao, Dpto. Valle Viejo y consta de un: a.- Invernadero tipo Armería modificado; b.- Túnel de secado interior al invernadero; c.- Cámara de calentamiento auxiliar; d.- Intercambiadores de calor gases/aire.

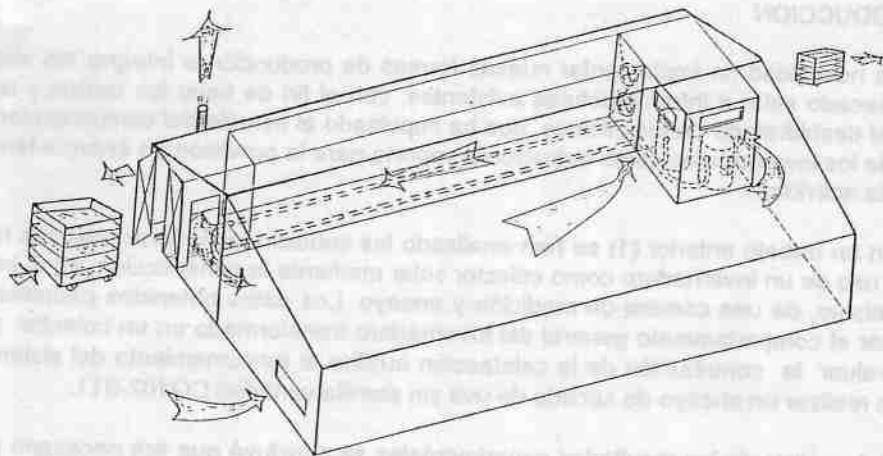
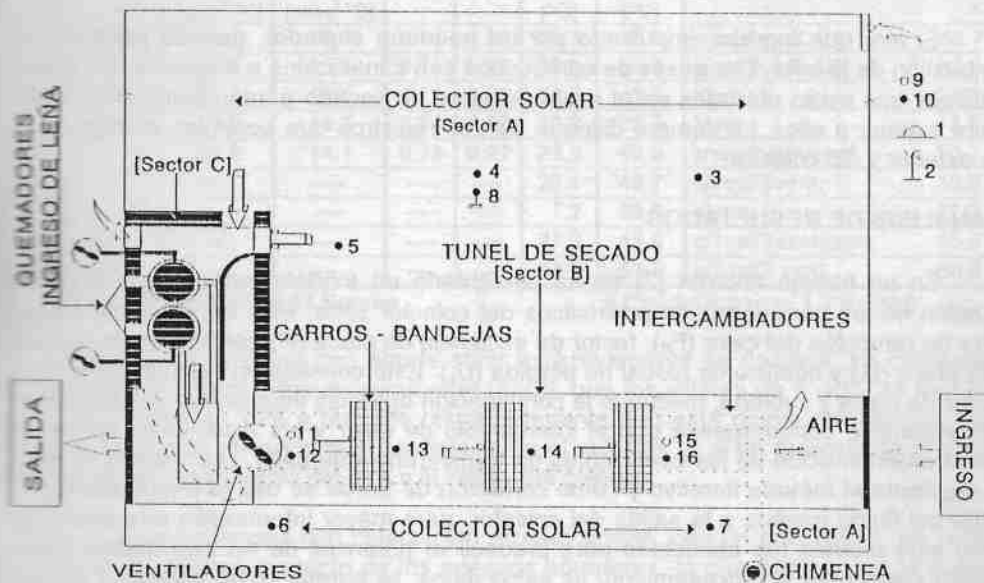


Fig. 1. Vista general del sistema

El invernadero consiste en una estructura del tipo Armería simplificada con las siguientes características: 16 m de ancho, 21 m de largo, 3.5 m de altura máxima, 2 m de altura en los laterales y una superficie disponible de 336 m<sup>2</sup>. La estructura del invernadero se construyó en madera de eucalipto, utilizando plástico de larga duración térmica (L.D.T.) de 150 micrones como cubierta, con su eje principal orientado en la dirección Este - Oeste, con una cara lateral en exposición completa hacia el Norte. Para mayor detalle constructivo, ver trabajo referencia (1). En la Fig. 1, se muestra una vista general del sistema.

**Invernadero - Colector:** Básicamente la idea consiste en acondicionar un sector del interior del invernadero para transformarlo en un túnel y adosarle los sistemas auxiliares

de calentamientos de acuerdo con las necesidades térmicas del proceso de secado. El resto del espacio disponible se transforma en un colector térmico solar mediante la incorporación de una lámina de plástico negro extendida en el interior del mismo, de manera tal, que con la cubierta plástica transparente del invernadero, se forma un ducto por donde circula el aire que ingresa para su calentamiento. El área efectiva de colección es 305 m<sup>2</sup>, Fig. 2, sector A.



**REFERENCIAS**

- Temperatura de bulbo seco
- Temperatura de bulbo húmedo
- ⊥ Temperatura de suelo
- ⊥ Anemómetro
- ☀ Solarímetro

Fig.2. Esquema del Invernadero Secador

Las cortinas laterales del invernadero han sido bajadas totalmente y enterradas a lo largo del perímetro del mismo para evitar la fuga o entrada de aire desde el exterior.

**Invernadero - Secador:** El túnel de secado ha sido construido con postes y travesaños de madera, cubiertos por plástico transparente tipo U.V.T., ubicado bajo la cubierta del invernadero a lo largo de su eje principal y a una distancia de 1 m de la pared lateral Norte, coincidiendo con las puertas de acceso. En su interior se han instalado dos rieles que permiten el desplazamiento de los carros porta bandejas en sentido Oeste - Este. Al final del túnel se encuentran dos ventiladores eléctricos axiales montados sobre una estructura soporte móvil, que permite su desplazamiento en el momento que es necesario el paso de los carritos, Fig. 2, sector B.

Cuando el invernadero - secador trabaja en forma continua, los carritos se mueven avanzando hacia el fondo del túnel, mientras el aire caliente fluye en sentido contrario. El producto es calentado por el aire caliente que sale del colector, previo paso por la cámara de combustión. De esta forma, el producto semiseco recibe aire a la máxima temperatura, sin disminuir su potencial de secado para el producto ubicado en los otros carros. En consecuencia, es importante destacar que esta nueva disposición de la estructura del secador facilita el manejo del producto, aporta energía adicional por radiación a través de la pared norte y del techo del túnel e incrementa la productividad respecto de los sistemas clásicos.

**Calentamiento auxiliar:** En el extremo Este del invernadero se construyó, perpendicular al túnel, una cámara para la concentración de la calefacción auxiliar. Fue construida con paredes de mampostería, techo metálico con un recubrimiento de lana de vidrio y barro. En su interior se instalaron dos hornos quemadores de leña contruidos en chapa metálica, que disponen de compuertas para el ingreso del material combustible, extracción de cenizas y entrada y salida de aire de combustión, Fig. 2, sector C.\*

El aire que ingresa, impulsado por un pequeño soplador, permite mantener la combustión de la leña. Los gases de combustión son canalizados a través de dos caños metálicos que están ubicados en el suelo del túnel de secado e intercambian calor con el aire exterior a ellos. La cámara dispone de tres registros que controlan el ingreso de aire exterior y del colector.

### 3.- ANALISIS DE RESULTADOS

En un trabajo anterior (2) se ha presentado un modelo teórico para la determinación de los parámetros característicos del colector solar, esto es: rendimiento ( $\eta$ ), factor de remoción del calor ( $F_R$ ), factor de eficiencia de placa ( $F'$ ) coeficiente de pérdida de la placa ( $U_L$ ) y coeficiente global de pérdida ( $U_L$ ). Este consiste en calcular las temperaturas de placa y cubierta, mediante la combinación entre las ecuaciones de balance en cada superficie comprometida con el intercambio de calor y las ecuaciones empíricas para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor. Los valores se ajustan mediante el método iterativo y como condición de borde se usa la temperatura promedio del fluido medido a la salida del colector, para mayor información referencia (2). Como este modelo fue concebido para predecir el potencial de un invernadero como colector solar, para el procesamiento de estos datos, se agregó como condición de borde el  $Q$  útil obtenido experimentalmente. Esto permite un mayor ajuste de las temperaturas obtenidas del modelo y se logra un mejor valor de los coeficientes de transferencia.

Los ensayos fueron realizados durante la temporada de verano, caracterizándose por cuatro tipos de experiencias que incluyen al sistema en vacío con y sin aporte auxiliar y secado de productos con y sin aporte auxiliar. Para la medición de las variables más importantes se utilizó un sistema de adquisición automática de datos por tarjeta PC LAB 812 en computadora AT/286. La temperatura se midió con sensores LM 335, la humedad con bulbo seco y húmedo, la radiación con un radiómetro Kipp & Zonnen, la velocidad del aire con un anemómetro manual de hilo caliente y la velocidad de viento exterior con un anemómetro de cazoleta. En la Fig. 2, se indican con números la ubicación y tipo de los sensores.

A los efectos de analizar los resultados obtenidos durante los cinco meses de ensayo, que comprenden desde el mes de Febrero hasta Junio, se han seleccionado nueve experiencias teniendo en cuenta la cantidad de radiación incidente y las características del día, contemplando días con cielo cubierto, semicubierto y claro.

En base a los datos experimentales de la temperatura del aire a la salida del colector, temperatura ambiente, radiación total incidente sobre superficie horizontal y flujo de calor útil o ganado por el sistema, se ha calculado con el modelo teórico los parámetros que caracterizan al invernadero - colector.

En la tabla I se muestran los valores promedio de la radiación, temperatura ambiente y los parámetros característicos del colector, destacándose que las cinco primeras experiencias corresponden a ensayos sin aporte auxiliar, con días claros y semicu-

biertos. Los restantes corresponden a días cubiertos y semicubiertos, con aporte auxiliar por la quema de leña.

TABLA I: Características del colector invernadero  
- Valores Promedios -

Exp [N°]	R [w/m <sup>2</sup> ]	U <sub>t</sub> [w/m <sup>2</sup> °C]	U <sub>L</sub> [w/m <sup>2</sup> °C]	F'	F <sub>R</sub>	T <sub>a</sub> [°C]	T <sub>f</sub> [°C]	Observaciones	T <sub>fmax</sub>
1	650.9	26.9	15.9	0.74	0.25	29.3	48.8	s/cal/1vent. (*)	58.7
2	630.2	27.1	15.1	0.70	0.26	30.6	50.3	s/cal/2vent. (#)	62.4
3	472.4	26.8	14.5	0.73	0.27	22.7	43.2	idem	53.2
4	322.5	26.6	14.3	0.74	0.28	19.2	29.7	idem	43.5
5	381.1	26.8	14.7	0.73	0.27	24.3	40.5	s/cal/2vent/prod.	50.2
6	472.5	----	----	----	----	26.1	49.7	c/1cal/2vent.	59.9
7	175.8	----	----	----	----	7.2	26.6	idem	37.2
8	371.9	----	----	----	----	27.3	42.6	c/1cal/2vent/prod.	55.6
9	536.9	----	----	----	----	24.5	53.7	c/2cal/2 vent.	69.8

\* Caudal másico: 0.63 Kg/seg

# Caudal másico: 1.3 Kg/seg

Durante los ensayos con aporte solar exclusivamente se destaca, en comparación con los datos obtenidos anteriormente (1),(2), que los valores de F' y F<sub>R</sub> se han incrementado entre un 15% y un 50% respectivamente con esta nueva disposición. Por otro lado, se puede observar que ha disminuido el valor de U<sub>L</sub> y ha aumentado el valor de la temperatura promedio del aire a la salida del colector.

En las experiencias con calefacción auxiliar simple, con un solo horno, se verifican valores superiores respecto de los ensayos anteriores, lo que implica que la nueva disposición, también ha mejorado el aprovechamiento del calor producido por el sistema auxiliar, sin embargo se advierte la necesidad de aumentar el rendimiento de los hornos quemadores. En este sentido se han obtenido eficiencias promedio en el orden del 27% con un consumo de leña que va desde 90 Kg/día a 145 Kg/día para la calefacción simple y doble respectivamente. El poder calorífico promedio de la leña utilizada fue de 4530 Kcal/Kg., valor determinado experimentalmente (3).

En la tabla II se muestra el balance de energía total, advirtiéndose que las mayores pérdidas de calor están asociadas con los mecanismos de transferencia por radiación, alcanzando valores que oscilan entre un 40% a 60% de la pérdida total. Cabe recordar que los ensayos han sido realizados con un invernadero de plástico transparente.

TABLA II: Balance de Energía  
- Valores Totales -

Exp [N°]	E <sub>r</sub> [MJ]	E <sub>ar</sub> [MJ]	E <sub>L</sub> [MJ]	E <sub>u</sub> [MJ]	EP <sub>cd</sub> [MJ]	EP <sub>cv</sub> [MJ]	EP <sub>ra</sub> [MJ]	EP <sub>t</sub> [MJ]	η [%]
1	7573.9	4544.3	----	483.1	32.2	2891.3	1137.7	4061.2	6.4
2	7358.1	4414.9	----	984.4	51.2	1687.7	1691.6	3430.5	13.4
3	5181.6	3954.1	----	1015.1	49.7	1224.5	1664.5	2938.7	19.6
4	3498.6	2099.2	----	484.3	12.8	431.2	1170.9	1614.9	13.9
5	4133.3	2479.9	----	733.4	26.8	289.2	1430.6	1746.6	17.7
6	4652.9	2791.7	404.5	1075.1	32.6	351.2	1737.3	2121.1	21.3
7	1856.5	1113.9	455.6	867.5	4.9	168.4	528.7	702.0	37.5
8	4031.4	2418.8	152.4	701.7	18.9	730.0	1120.6	1869.5	16.8
9	5622.7	3373.6	797.7	1314.6	42.8	1212.8	1601.0	2856.7	20.5



La otra pérdida significativa es la debida al proceso de transferencia por convección, en razón de que el invernadero expone una gran superficie al intercambio térmico. Asimismo la pérdida por conducción no supera el 2% del total, siendo el factor ( $\tau\alpha$ ) igual a 0.6, con lo cual las eficiencias globales promedio no superan el 20%.

El sistema ha sido ensayado en diferentes condiciones de calentamiento, realizándose aportes auxiliares de calor que van desde un 30% al 100% del flujo de calor útil disponible para el secado.

A los efectos de visualizar lo discutido precedentemente se incluyen gráficos de días típicos, donde se ha ensayado el sistema sin/con calefacción auxiliar simple y doble.

En la Fig. 3 y 4, se muestra la variación de la temperatura de salida del colector, temperatura ambiente, flujo de radiación incidente, flujo de calefacción auxiliar y el flujo de calor por colección solar.

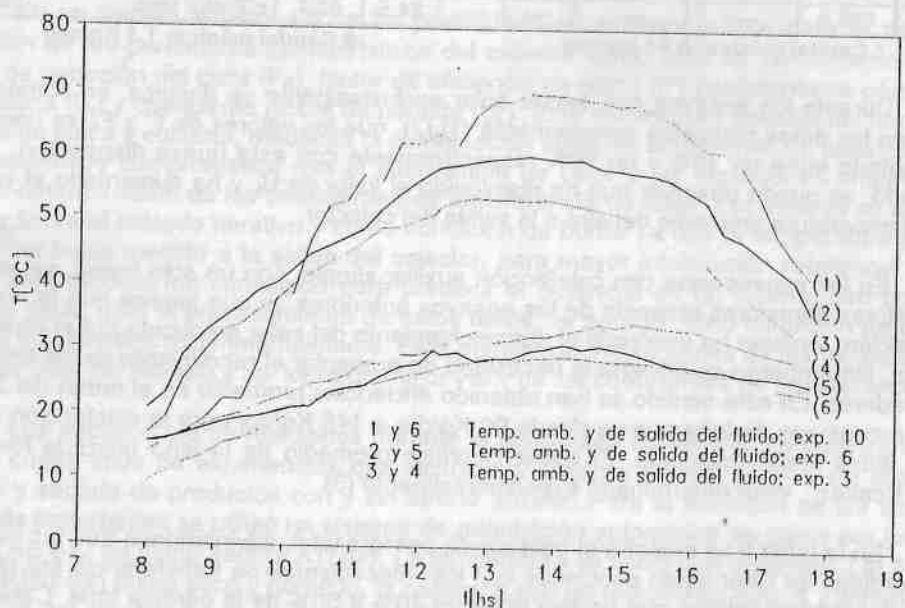


Fig. 3. Variación de las temperaturas del fluido a la salida del colector y ambiente para tres condiciones de calentamiento

Durante el periodo de ensayo se realizaron experiencias de secado de romero, albahaca, lemon grass, etc., aromáticas de la zona. En la Fig. 5, se muestra la variación de la temperatura del aire a la salida del colector, la temperatura ambiente, el flujo de calor antes del ingreso al túnel, con y sin calefacción auxiliar y el flujo de calor incidente por radiación solar, todos en función del tiempo durante el proceso de secado.

Los primeros dos días se utilizó calefacción auxiliar a leña destacándose que en el 1er. día las condiciones climáticas eran muy favorables, de manera, que la contribución de leña fue del orden del 30%, mientras que durante el 2do. día la radiación incidente disminuye en forma considerable a valores promedios de  $170 \text{ w/m}^2$  y en consecuencia, se incrementa el aporte auxiliar para compensar la falta de energía incidente. Se advierte que el aporte auxiliar, incrementa la temperatura, aumentando la pérdida por radiación y convección.

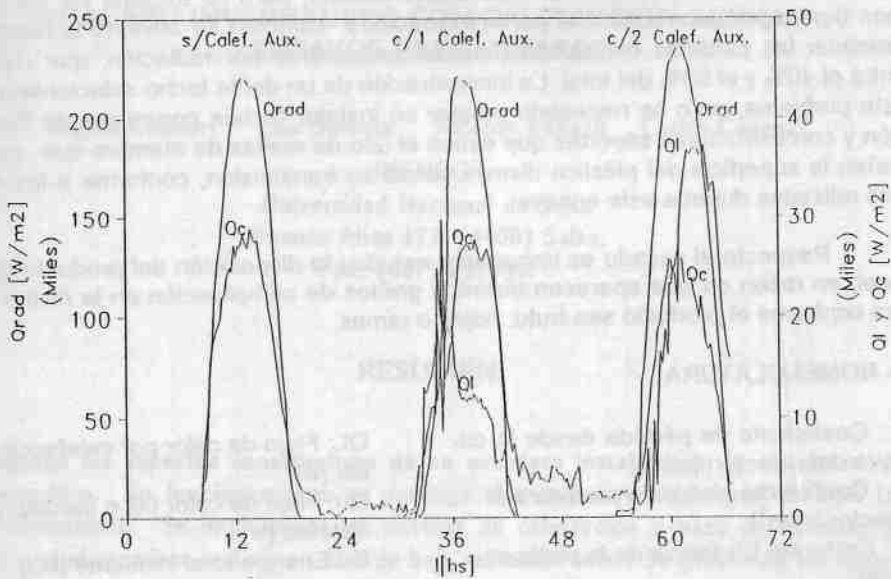


Fig. 4. Variación del flujo de calor incidente por radiación, leña y colección solar en función del tiempo para diferentes condiciones de calentamiento

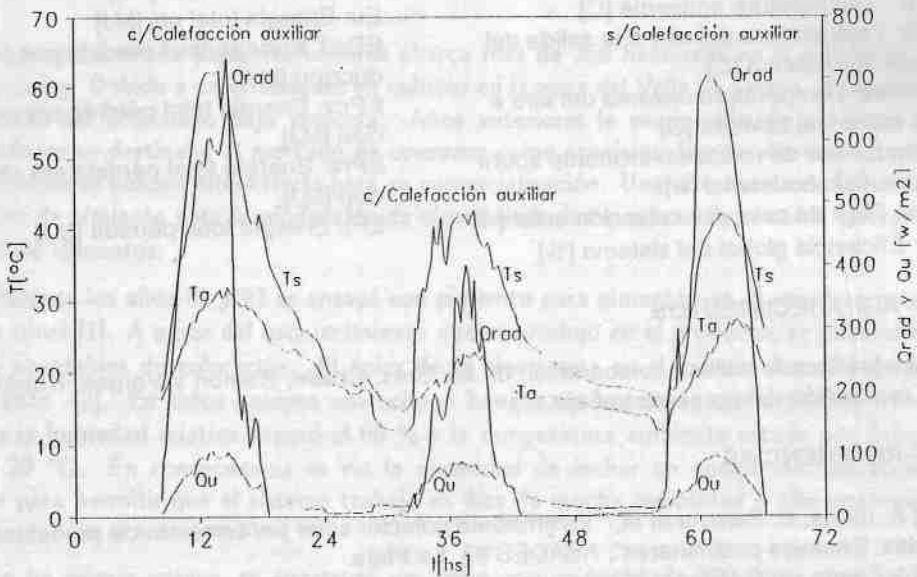


Fig. 5. Variación de temperatura, flujo de calor útil y radiación en función del tiempo durante el proceso de secado de romero

#### 4.- CONCLUSIONES

El comportamiento del sistema en general es aceptable, habiéndose conseguido niveles de temperaturas óptimos para el secado continuo de productos agrícolas, especialmente aromáticas. Sin embargo, es necesario disminuir los consumos de leña mejorando la transferencia de calor de los hornos quemadores y ajustando, en lo posible,

automáticamente los aportes de calefacción auxiliar, para no exceder los valores máximos de temperatura admisible por los productos. También se advierte la necesidad de disminuir las pérdidas del sistema, fundamentalmente por radiación, que representan entre el 40% y el 60% del total. La incorporación de un doble techo solucionaría en parte este problema, pero es necesario pensar en instalar techos corredizos de fácil reposición y con estructuras soportes que eviten el uso de mallas de alambre que manchan y dañan la superficie del plástico disminuyendo su transmisión, conforme a las experiencias realizadas durante este ensayo.

Respecto al secado es importante estudiar la disposición del producto dentro del túnel, en razón de que aparecen distintos grados de complicación en la distribución del aire conforme el producto sea fruto, hojas o ramas.

## 5.- NOMENCLATURA

$U_i$ : Coeficiente de pérdida desde la cubierta del colector [ $w/m^2$ ]	QL: Flujo de calor por calefacción auxiliar [w]
$U_L$ : Coeficiente global de pérdida del colector [ $w/m^2$ ]	Qu: Flujo de calor útil o ganado por el sistema [w]
$F'$ : Factor de Eficiencia de la placa colector	Er: Energía total incidente [MJ]
$F_R$ : Factor de remoción del calor	$E_{\alpha t}$ : Energía total absorbida por la placa [MJ]
$T_f$ : Temperatura del aire a la salida del colector/sistema [C]	EL: Energía total suministrada por la calefacción auxiliar [MJ]
$T_a$ : Temperatura ambiente [C]	Eu: Energía total útil [MJ]
$T_s$ : Temperatura del aire a la salida del colector/sistema [C]	EPcd: Energía total pérdida por conducción [MJ]
$T_{fmax}$ : Temperatura máxima del aire a la salida del colector [C]	EPcv: Energía total pérdida por convección [MJ]
Qrad: Flujo de radiación incidente sobre superficie horizontal [w]	EPra: Energía total pérdida por radiación [MJ]
Qc: Flujo de calor por colección solar [w]	EPT: Energía total pérdida [MJ]
$\eta$ : Eficiencia global del sistema [%]	

## 6.- AGRADECIMIENTOS

Se agradece la valiosa colaboración de los Sres. Chaile, Ramón y Vargas, Rubén; para la realización del presente trabajo.

## 7.- REFERENCIAS

- [1] A. Iriarte, L. Saravia et al, " Invernadero colector solar para secado de productos agrícolas: Ensayos preliminares", ASADES'93, La Plata.
- [2] A. Iriarte, V. Garcia, et al, " Uso de invernadero como secadores solares: diseño y cálculo térmico", ASADES'92, pag. 485 - 493, Tomo II, 1992.
- [3] Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, Laboratorio de Energía de Biomasa.