

COLECTORES SOLARES DE PVC PARA CALENTAMIENTO DE CANTEROS Y CAMAS DE ENRAIZAMIENTO EN INVERNADEROS #

A. Iriarte², S. Bistoni y L. Saravia^{1,2}

INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca, Argentina, iriarte@plab.unca.edu.ar

RESUMEN: En el empleo de las técnicas de propagación para producción de plantas así como en los canteros de los rusticaderos de vivero, es importante mantener las temperaturas de los sustratos en rangos prefijados. La forma más común de calefaccionarlos es utilizando electricidad o haciendo circular fluidos calientes por cañerías. El presente trabajo describe las características y el comportamiento de un calentador solar de agua de 16 m², externo al invernadero, cuya superficie absorbadora esta formada por bolsas de PVC negro. El sistema fue simulado con el SCEPTRE bajo las condiciones climáticas típicas de la zona. La calibración y validación del modelo se realizó comparando los datos experimentales y simulados de la temperatura de salida del agua. Para el ajuste la desviación promedio fue de 0,35 con un error relativo promedio de 1,5 %. El colector propuesto permite obtener agua a temperaturas suficientes para su utilización en invernaderos siendo su diseño de bajo costo y fácil de construir.

Palabras clave: colector solar, calentamiento de canteros, simulación de colectores

INTRODUCCION

Debido a la gran demanda de plantas frutales, originada por la radicación de emprendimientos agrícolas mediante diferimientos impositivos en la Provincia de Catamarca y La Rioja, surge la necesidad de producir una cantidad importante de plantines, especialmente de higuera, nogal, olivo y forestales, especialmente algarrobo. La mayoría de los viveristas utilizan técnicas de propagación vegetativa bajo niebla. Ésta consiste en colocar una estaca separada de la planta madre en condiciones favorables para la formación de raíces y tallos. Para lograr óptimos resultados se requieren condiciones muy bien controladas. Con este tipo de propagación se conservan todas las cualidades de la planta madre. El proceso posterior al enraizamiento, la rusticación, permite afianzar la zona radicular. Durante este período las condiciones no son tan estrictas, pero el calentamiento de la zona basal es un factor importante a la hora de evaluar el crecimiento de las plantas.

Condiciones en camas de enraizamiento

- Temperatura entre 18 a 21 °C en la zonal basal de la estaca.
- 80 % de humedad ambiente para evitar la deshidratación por pérdida de agua a través de las hojas.
- Temperatura entre 21 a 25 °C en la zona media y apical.
- Medio de enraizamiento limpio, húmedo, bien drenado y aireado.
- Buena cantidad de luz aunque no excesiva. No mayor que 2000 lux.
- Tipo y concentración del regulador de crecimiento (hormona de crecimiento) adecuado para la especie y variedad a enraizar.

Condiciones en los canteros de rusticación

- Temperatura entre 12 a 18 °C en la zonal radicular.
- 60 % de humedad ambiente para evitar la deshidratación por pérdida de agua a través de las hojas.
- Temperatura entre 21 a 35 °C en la zona media y apical.
- Buena cantidad de luz.; no inferiores a 3500 lux.

La puesta a punto de estas condiciones ambientales requiere de una tecnología compleja que implica altas inversiones. Las camas de enraizamiento se pueden calefaccionar mediante resistencias eléctricas colocadas debajo de las cajas que contienen perlita que es el sustrato utilizado para lograr el enraizamiento. Otra alternativa es hacer circular aire o agua caliente a través de conductos o mangueras convenientemente colocadas.; la circulación de aire presenta la ventaja que la infraestructura necesaria es de menor costo, pero por su baja densidad y capacidad térmica, la conducción entre dos puntos distantes se hace muy costosa. Si el fluido circulante es agua este problema no se presenta, pero su costo de inversión es más alto.

Iriarte *et al.* (1981) iniciaron el desarrollo de un intercambiador de calor agua - aire con superficie plástica de bajo espesor, logrando disminuir los costos de fabricación y mantenimiento. Los primeros ensayos se realizaron utilizando una solución salina caliente proveniente de una poza solar (Iriarte *et al.* 1981, Lesino *et al.*, 1983). Modificaciones posteriores (Saravia *et*

Parcialmente financiado ANPCyT, UNCa, INTA

¹ INENCO, UNSa

² Investigador del CONICET

al., 1992, Iriarte *et al.*, 1993) lograron un sistema que cumplía con una doble función: *colector* durante las horas diurnas e *intercambiador de calor* durante la noche. Posteriormente, utilizando el mismo diseño de la placa absorbadora de plástico, se construyeron colectores solares planos para ubicarlos en el exterior de los invernaderos (Bistoni *et al.*, 2001) Si bien estos diseños son sencillos y de bajo costo, no satisfacen la demanda ya que las temperaturas obtenidas no superan los 30 °C.

El objetivo del presente trabajo es el análisis del comportamiento y simulación de un calentador solar, de bajo costo, para calentar el agua que circula a través de tubos colocados debajo de los canteros y/o camas de enraizamiento, permitiendo que éstas mantengan una temperatura óptima. Los objetivos de la simulación fueron dos: a) Calibrar y/o validar un modelo de computadora que pueda ser usado como una herramienta confiable para la simulación; b) Disponer de una herramienta mediante la cual sea posible realizar un análisis paramétrico sistemático que ayude a establecer pautas sobre diseño o comportamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de colector solar de plástico

La placa absorbadora está formada por bolsas de PVC negro de 500 micrones de espesor, de 0,50 m de ancho y 2 m de largo, con un diseño similar a los usados por Saravia *et al.* (1992) y Bistoni *et al.* (2001). El agua ingresa a cada bolsa por la parte superior, en donde se forma una cámara de agua, permitiendo de esta forma un flujo uniforme en todo el recorrido. Mediante un tubo de plástico se recoge el agua que se acumula en un reservorio convenientemente aislado de 15 m³.

Las bolsas van apoyadas sobre una malla sima de 0,15 x 0,15 m, sin aislación, cubierta con un plástico negro que esta soportada por una estructura de madera e inclinada 38° respecto a la horizontal. La cubierta del colector es de plástico transparente L.D.T. y está apoyada sobre una malla sima de iguales características pero pintada de blanco. Una cortina de plástico cierra la estructura de madera por los laterales, Figura 1. El diseño del colector es modular, realizado con materiales de bajo costo y su armado no requiere de personal especializado.

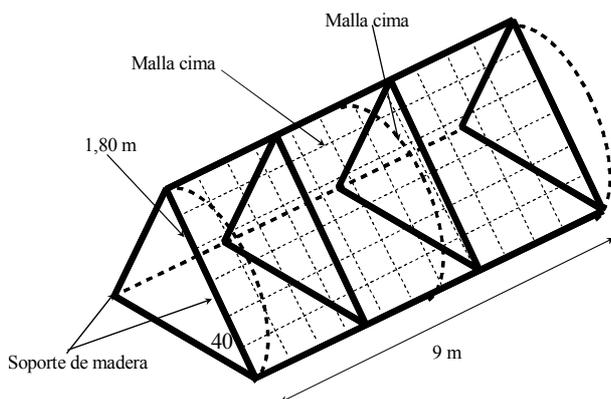


Figura 1. Esquema del colector



Figura 2. Vista del colector solar de PVC de bajo costo

El prototipo ensayado tiene una superficie total de 16 m². Para la circulación del agua se utilizó una bomba de 373 W con un caudal de 0,28 kg s⁻¹.

En la medición de las temperaturas se utilizaron semiconductores LM35 conectados a un sistema de adquisición de datos tipo ADAMS con memoria que permitió registrar sus valores cada 30 minutos. Se midió la temperatura del agua a la entrada y salida del colector y la temperatura ambiente. Para la medición de las radiaciones incidentes, inclinada y horizontal, se utilizaron radiómetros tipo Kipp & Zonen.

Determinación de la curva característica del colector de PVC

Para la determinación de la curva de eficiencia de la placa absorbadora se hicieron ensayos in situ, y se consideró que la placa está a la temperatura promedio de agua T_m (media aritmética de la temperatura de entrada y salida del fluido en el colector). Los puntos obtenidos se ajustaron linealmente mediante la ecuación:

$$\eta = \eta_0 - U^* (T_w - T_a)/I \quad [1]$$

donde η_0 es la eficiencia cuando el colector está a la temperatura ambiente y U^* el coeficiente global de pérdida.

ANÁLISIS TEÓRICO

La descripción del modelo numérico térmico - eléctrico incluye el análisis de la transferencia de calor entre las distintas partes constitutivas del colector de agua, la determinación de temperaturas y la eficiencia del mismo. La resolución de este modelo se realizó mediante el software "System for Circuit Evaluation and Prediction of Transit Radiation Effects" (SCEPTRE), utilizado para la resolución de circuitos eléctricos en estado transitorio. El sistema fue simulado con las condiciones climáticas típicas de la zona para el periodo invernal y para validar el modelo teórico se compararon los

resultados predichos con los datos experimentales.

Ecuaciones del balance de energía

La figura 3 muestra el modelo físico del colector solar. La irradiancia absorbida por la cubierta es $Sc = \alpha_c I$ donde α_c es la absorptividad de la cubierta e I la irradiancia que llega sobre la placa del colector; la absorbida por la placa es $Sp = \tau_c \alpha_p I$; τ_c es la transmisividad de la cubierta y α_p la absorptividad de la placa.

Los procesos de transferencia de calor considerados son: procesos convectivos entre placa y la cubierta ($hc, p-c$), convección debida al viento ($hc, c-a$) por la parte superior y a través de una capa de aire estacionario (U_b) por la base; procesos radiativo entre placas ($hr, p-c$), cubierta y cielo ($hr, c-s$) y entre placa y cielo ($hr, p-s$) debido a que el plástico es semiopaco a la radiación infrarroja. No se consideró la capacitancia térmica del plástico de la cubierta ni de la placa absorbidora.

Determinación de los coeficientes de transferencia de calor

- ❖ *Coefficiente de transferencia de calor por radiación.* Para la transferencia entre la cubierta y el cielo, referida a la temperatura ambiente, se utilizó la fórmula sugerida por Duffie y Beckman (1991). De acuerdo a estos autores, para una cubierta parcialmente transparente a la radiación infrarroja el coeficiente de transferencia de calor radiativo entre placa y cubierta es:

$$h_{r,p-c} = \sigma \epsilon_p \epsilon_c \frac{(T_p + T_c)(T_p^2 + T_c^2)}{1 - \rho_p \rho_c}$$

y entre la placa absorbidora y el cielo, el coeficiente, referido a la temperatura ambiente es:

$$h_{r,p-s} = \frac{\tau_c \epsilon_p \sigma (T_p^4 - T_s^4)}{(1 - \rho_p \rho_c)(T_p - T_a)}$$

- ❖ *Transferencia de calor debida a la acción del viento.* El coeficiente de transferencia de calor debido al viento se fijó en $15 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- ❖ *Coefficiente de pérdida desde la parte inferior.* Para este coeficiente se consideró que el aire debajo de la placa está en estado estacionario y se tomó el valor $U_b = 5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- ❖ *Transferencia de calor convectiva desde placa y cubierta hacia el aire comprendido entre ellas.* Se fijó en $5 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ya que no hay movimiento de aire dentro del colector.

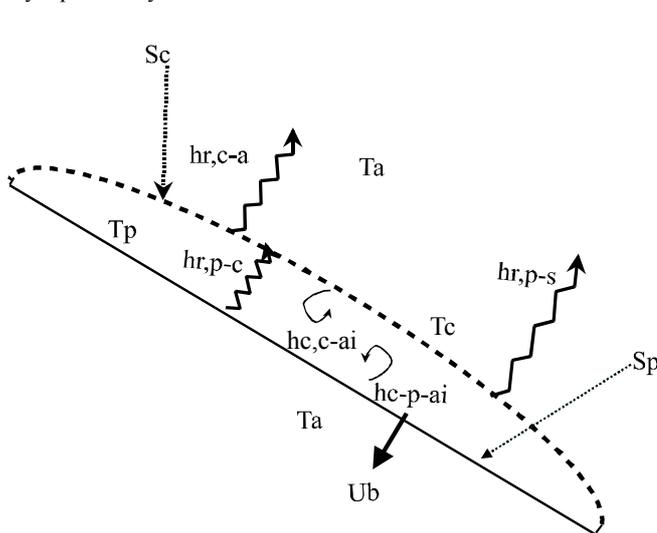


Figura 3. Modelo físico de la transferencia de calor

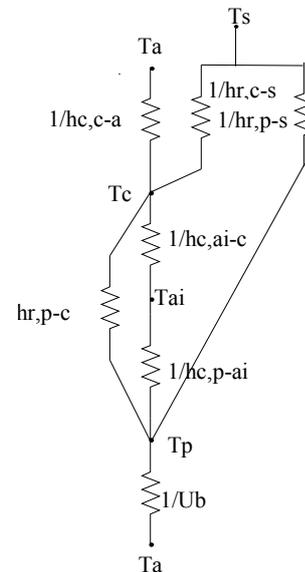


Figura 4. Red térmica

Analogía térmica - eléctrica

Las transferencias de calor entre las distintas partes del colector se analizaron mediante la analogía térmica- eléctrica que permite de un modo sencillo visualizar los intercambios de calor. Se supone que la temperatura del agua tiene la misma temperatura que la bolsa de PVC.

Por lo tanto para la determinación de la red térmica se consideraron cuatro nodos que corresponden a: aire ambiente exterior (T_a), cubierta (T_c), aire interior (T_{ai}) y placa absorbidora (T_p). T_s es la temperatura de cielo, figura 4. Para resolver el circuito térmico se utilizó el programa SCEPTRE que permite resolver circuitos eléctricos en estado transitorio (Becker D., 1998). Como datos de entrada para la simulación se utilizaron los valores de la radiación global sobre superficie inclinada, velocidad de viento, caudal de agua en el colector y temperatura ambiente.

Para mejorar los resultados de la simulación se dividió el colector en dos módulos. La temperatura de salida del agua calculada por el modelo, se comparó con los datos obtenidos experimentalmente. Los valores de la absorptividad, emisividad y transmisividad para las distintas superficie fueron tomadas de valores aceptados generalmente por la bibliografía y no fueron medidos.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Eficiencia instantánea del colector

En la Fig. 5 se muestra los valores experimentales de las eficiencias instantáneas en función de $(T_w - T_a)/I$ para distintas temperaturas de entrada del agua. Como U_L , F_R y $(\tau\alpha)$ no son constantes los puntos no quedan sobre una recta como era de esperar.

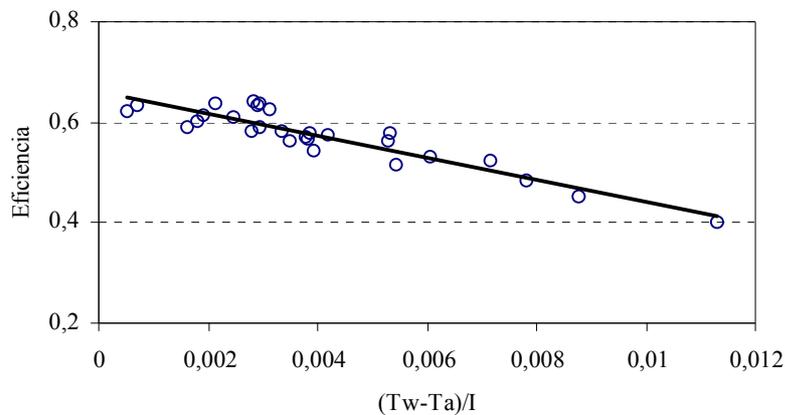


Fig.5. Eficiencia instantánea del colector

La ecuación de ajuste es $0,66 - 21,8 (T_w - T_a) / I$ con un factor de correlación de 0,84. Por lo tanto la eficiencia para la temperatura promedio del agua igual a la del ambiente, η_0 , es 0,66 y el coeficiente de pérdida $U^* = 21,8 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Comportamiento experimental del colector

El colector fue ensayado durante los meses de invierno. Para el caudal utilizado, $0,28 \text{ kg s}^{-1}$, la temperatura del agua a la salida del colector aumentó aproximadamente $9 \text{ } ^\circ\text{C}$ entre las 12:30 y las 15:30 horas, como se aprecia en la figura 6 para uno de los días de ensayo.

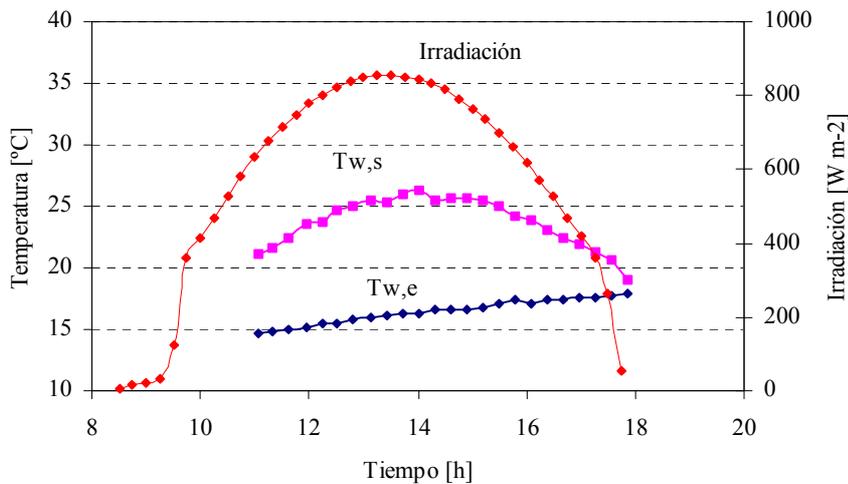


Figura 6. Temperatura del agua a la entrada y salida del colector solar. Irradiación sobre el plano del colector

En la figura 7 se muestra la variación de la eficiencia en función del tiempo para el mismo día de ensayo. Se aprecia que los valores de la eficiencia varían entre un 58 % para las 11:00 horas y un 67 % para las 15,20 horas.

Calibración o ajuste del modelo

Para la calibración del modelo se compararon las predicciones teóricas de la temperatura de salida del agua con los datos experimentales correspondientes a un día de ensayo con un caudal de 0,28 kg/s . Las variables de ajuste fueron los coeficientes radiativos: a) para la transferencia radiativa entre placa y cubierta se utilizó $\epsilon_p \cdot \epsilon_c / (1 - \rho_p \rho_c) = 0,50$ y b) para placa y cielo $\tau_c \cdot \epsilon_p / (1 - \rho_c \rho_p) = 0,20$. Para el cálculo de la radiación absorbida por la cubierta y la placa se utilizaron los coeficientes $\alpha_c = 0,20$ y $\tau_c \alpha_p = 0,66$ respectivamente. En la figura 8 se muestran las curvas de la temperatura de salida del agua experimental y simulada para el ajuste del modelo.

El ajuste del modelo dio un error porcentual del 1,5 % y una desviación promedio de 0,35. En la figura 8 se muestra las curvas de ajuste de la temperatura de salida del agua.

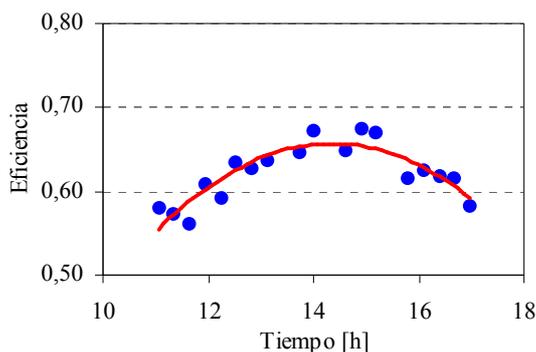


Fig. 7. Eficiencia experimental del colector de PVC

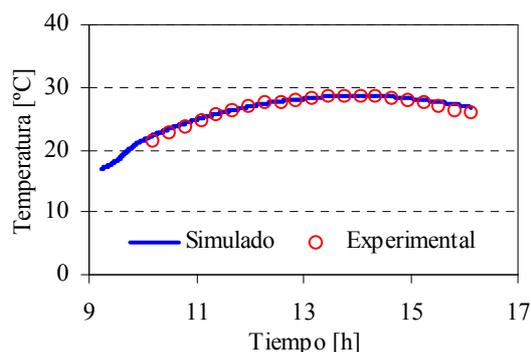


Figura 8. Ajuste de la temperatura para colector de PVC

Validación del modelo

La validación del modelo se realizó para otros días de ensayo con un error porcentual promedio del 2 % y una desviación promedio de 0,40.

Simulación del colector

El modelo se utilizó para simular el comportamiento del calentador de agua para distintos caudales de agua. Se define Q neto como la diferencia entre el calor útil generado por el calentador menos la potencia de la bomba. Como puede verse en la figura 9, la influencia de la bomba comienza a ser significativa para caudales superiores a 0,42 kg s⁻¹.

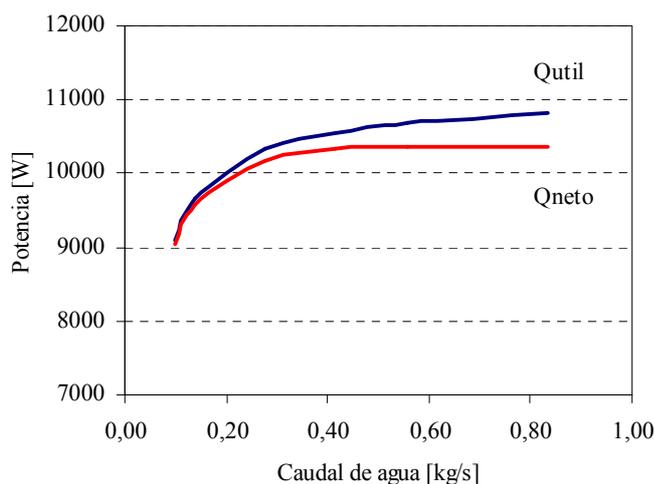


Figura 9. Relación entre calor útil y calor neto

CONCLUSIONES

El calentador de agua se comportó durante los meses de invierno de acuerdo a lo que se tenía previsto y cumple con las condiciones impuestas para su utilización en las camas de enraizamiento. El objetivo propuesto para la etapa siguiente es la construcción, en la estación experimental del INTA – Catamarca, de un banco de calentadores del diseño propuesto.

La utilización del software SCEPTRE permitió resolver el modelo teórico presentado y predecir el comportamiento del colector de agua sin recurrir a resoluciones numéricas complicadas.

NOMENCLATURA

S [$W\ m^{-2}$]	Radiación solar incidente sobre plano del colector
T [$^{\circ}C$]	Temperatura
h_r [$W\ m^{-2}\ ^{\circ}C$]	Coefficiente de transferencia radiativos
h_c [$W\ m^{-2}\ ^{\circ}C$]	Coefficiente de transferencia convectivo
U_b [$W\ m^{-2}\ ^{\circ}C$]	Coefficiente de pérdida por la base
σ	Constante de Stefan- Boltzman
ϵ	Emitancia
ρ	Reflectancia
τ	Tramitancia
Subíndices	
c	Cubierta
p	Placa
a	Ambiente
s	Cielo
ai	Aire entre placa y cubierta
w	promedio del agua colector
w,e	Agua entrada colector
w,s	Agua salida colector
I [$W\ m^{-2}$]	Radiación solar

REFERENCIAS

- Becker D (1998). Extended SCEPTRE, Vol. 1, User's Manual.
- Bistoni S, Iriarte A y Saravia L.(2001). Modelización de colectores solares de bajo costo, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol5., N° 1, 08 - 149 – 08 – 154.
- Duffie J. y Beckman W. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2da Ed. Wiley & Sons.
- Iriarte A., Luna D., Bistoni S., Zain El Din J. y Saravia L, (1981). Desarrollo de intercambiadores Agua – Aire para su uso en Secadero Solar, Actas de la 7ma Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, 30-34.
- Iriarte A., Bistoni S., Saravia L y Echazú R., (1993). Caracterización de un intercambiador de calor para calefacción de invernaderos., Actas de la 16 Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, Tomo II, 461 - 466
- Lesino G., Saravia L., Castro Padula L., Blasco D. y Hannecke G., (1983). Construcción y monitoreo de un invernadero y local adyacente con calefacción auxiliar por poza solar, Actas de la 8va Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, 9 - 15
- Saravia L., Echazú R., Cadena C. y Cabanillas C., (1992) Calentamiento solar de invernadero en la Provincia de Salta, Actas de la 15 Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, Tomo II, 371 – 377.

ABSTRACTS: Adequate temperatures in root zones are necessary for plants propagation techniques and beds for special greenhouses. The common ways to achieve them are by electricity or by flowing hot fluids along tubes. The present work describes the characteristics and the behavior of a 16 m² solar water heating, with a black PVC film absorber plate. The collector was simulated under typical weather conditions by the software SCEPTRE. The model adjustment and validation were done comparing experimental and simulated data. The exit water temperature average deviation was 0,35 with an average percentage error for the adjustment. The proposed collector allows to increase water temperature to adequate levels to use into greenhouses.

Key Words: solar collector, bed heating, collector simulation