

PANTALLAS TERMICAS ALUMINIZADAS EN INVERNADEROS. MODELIZACION Y ENSAYOS

Levit, H., Lara, M.A. Y Piacentini, R.
Grupo de Energía Solar,
Instituto de Física Rosario (CONICET - UNR)
Bv. 27 de Febrero 210 Bis - 2000 Rosario
Tel: 041-853200 / 853222

RESUMEN

En este trabajo se estudia el microclima de un invernadero cuando se utilizan pantallas térmicas de polietileno aluminizado como método para reducir pérdidas de calor nocturna durante el invierno en invernaderos. En base a desarrollos teóricos anteriores se presenta un modelo matemático para simular los procesos de intercambio de calor y materia que ocurren en el invernadero con el sistema mencionado. Se describen las ecuaciones que gobiernan el sistema, el método de resolución y se aplica para la modelización de un caso concreto que fue ensayado experimentalmente.

El sistema analizado consiste en un invernadero tipo capilla que cuenta con una pantalla térmica horizontal con laterales verticales que se cierran lo más herméticamente posible en el momento que la radiación solar baja a valores despreciables y se vuelve a abrir cuando la radiación solar adquiere valores significativos. Como regla práctica se adoptó el cierre 15 minutos antes de la puesta del sol y apertura 30 minutos después de la salida del sol.

Con el objetivo de obtener resultados comparativos se dividió al invernadero en dos mitades, en una se utilizó el sistema de Pantallas Térmicas y la otra sirvió de testigo sin el sistema.

Se presentan los resultados teóricos de la simulación y los experimentales. Estos muestran un acuerdo aceptable, y al comparar este sistema con el testigo se obtiene una mejora en las condiciones térmicas que se evidencia en un salto de temperaturas en las horas más frías de 5.5 C, sin la utilización de energía adicional.

1. INTRODUCCION

Los invernaderos han demostrado ser un factor de desarrollo económico importante para el agro y especialmente para la hortifloricultura. En los últimos años se han expandido en forma notable pero su utilización no es, en la mayoría de los casos, acompañada de la tecnificación necesaria. Especialmente los métodos de climatización son generalmente inadecuados. El uso de pantallas térmicas aluminizadas (P.T.A.) provee un sistema de climatización pasivo de bajo costo, no contaminante y relativamente fácil de utilizar. Su costo de instalación y operación es económico.

Las P.T.A. consisten en una cubierta que se instala por encima de los cultivos y por debajo del techo del invernadero. Su posición es horizontal con laterales verticales a fin de lograr una hermeticidad total (fig. 1). El material constituyente es polietileno o polipropileno

aluminizado. La forma de operación es cerrando las pantallas cuando la radiación solar adquiere valores despreciables, como regla práctica se adoptó 15 minutos antes de la puesta del sol y abriéndolas 30 minutos después de la salida del sol. A su vez las P.T.A. pueden instalarse en un sistema de regulación de altura que permita adoptar la altura según las necesidades, como regla general se adopta la altura más baja posible.

El sistema reduce pérdidas energéticas al interrumpir el flujo convectivo de calor, la capa de aluminio refleja las radiaciones en una proporción muy alta reduciendo sustancialmente las pérdidas por radiación y al disminuir el volumen de aire del recinto que está en contacto con las plantas, el calor acumulado por suelo y plantas durante el día es cedido durante la noche a un menor volumen de aire y por lo tanto es más notable la influencia de este aporte.

El estudio teórico para analizar el comportamiento del sistema se realizó mediante la modelización matemática del microclima del invernadero, donde se tuvieron en cuenta los distintos intercambios de calor y materia.

Los ensayos experimentales tuvieron lugar en un invernadero experimental del grupo de energía solar del IFIR situado en el cordón hortícola de Rosario.

2. EL MODELO MATEMATICO

En base a los estudios en la modelización matemática de invernaderos realizados por Levit and Gaspar, 1988 y con las investigaciones realizadas en la modelización y uso de distintos tipos de pantallas térmicas, tales como las realizadas por Chandra and Albright, 1980; Meijer, 1980; Meyer, 1983; Nijskens et al. 1985; Staley et al, 1986; Arinze et al, 1986; Amsen, 1986; Fuller et al, 1987. Mougou et al, 1989; se desarrolló un modelo matemático que incorpora la capa Pantalla Térmica Aluminizada (P.T.A.).

Cuando la P.T.A. está colocada, es decir cubriendo los cultivos, el invernadero se puede considerar como un sistema de 6 capas: cubierta, aire 1, P.T.A., aire 2, cultivos y suelo, con homogeneidad en cada uno de ellos. Cuando la P.T.A. no está colocada el invernadero se considera como 4 capas ya descriptas y analizadas en Levit and Gaspar, 1988. A continuación se describen las ecuaciones que representan el balance de calor y materia para cada estrato del sistema de 6 capas. Los símbolos se presentan al final del estudio.

2.1. TEMPERATURA DE LA CUBIERTA

Según Levit and Gaspar, 1988, los flujos de energía a través de la cubierta son:

$$q = hf(T_e - T_{oc}) + (S_o - S_e) + (L_{oc} - L_{ec}) \dots\dots\dots(1)$$

$$q = h_s(T_{ic} - T_{a1}) + (S_d - S_u) + (L_{dc} - L_{uc}) - \lambda \rho (w_1 - w_{sc}) / r_w \dots\dots(2)$$

el calor transmitido por conducción a través de la cubierta es:

$$q = k_c(T_{oc} - T_{ic}) / \delta_c \dots\dots\dots(3)$$

2.2. TEMPERATURA DEL AIRE INTERIOR SUPERIOR (1)

El balance de calor por unidad de área de suelo es:

$$hs(Tic - Ta1)Ac/Ab + ht(Tot - Ta1) + hv(ie - Ta1) +$$

$$h12(Ta2 - Ta1) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

donde los distintos términos representan: transferencia convectiva de calor entre cubierta (cara interior) y aire interior (capa superior), entre aire interior (capa superior) y P.T.A. (cara superior), intercambio de calor por ventilación con el exterior e intercambio de calor entre aire interior (capa superior) y aire interior (capa inferior), este último término corresponde a las infiltraciones a través de la P.T.A. debido a una imperfecta hermeticidad, generalmente se procura que este término sea nulo.

2.3. HUMEDAD DEL AIRE INTERIOR SUPERIOR (1)

El balance de humedad por unidad de área de piso viene dado por la siguiente expresión:

$$\left\{ Ac(wsc - w1) / Ab.rw \right\} + \left\{ (wsto - w1) / rt \right\} + hv(we - w1) / cp +$$

$$+ h12(w2 - w1) / cp = 0 \dots \dots \dots (5)$$

donde los distintos términos representan: transferencia de masa entre aire interior (capa superior) y cubierta (cara inferior), entre aire interior (capa superior) y P.T.A. (cara superior), intercambio de masa por ventilación con el exterior e intercambio de masa entre aire interior (capa superior) y aire interior (capa inferior).

2.4. TEMPERATURA DE LA PANTALLA TERMICA ALUMINIZADA

Similarmente a lo que sucede con la cubierta se obtiene:

$$qt = ht(Tot - Ta1) + (Sd - Su) + (Lot - Let) - \lambda \left\{ (w1 - wsto) / rt \right\} \dots \dots (6)$$

$$qt = hs(Tit - Ta2) + (Sdt - Sut) + (Ldt - Lut) - \lambda \left\{ (w2 - wsti) / rt \right\} \dots \dots (7)$$

en la ecuación (6) con respecto a la (1) se agrega un término correspondiente al calor latente de condensación que ocurre en la interfase P.T.A. - aire.

El calor transmitido por conducción a través de la P.T.A. es:

$$qt = kt (Tot - Tit) / \delta t \dots \dots \dots (8)$$

2.5. TEMPERATURA DEL AIRE INTERIOR INFERIOR (2)

El balance de calor por unidad de área de suelo es análogo al presentado en Levit and Gaspar, 1988:

$$ht (Tit - Ta2) + hi(Ts - Ta2) + 2 ho(Tp - Ta2)Av.Lai/Ab +$$

$$+ h12(Ta1 - Ta2) + Qc/Ab = 0 \dots \dots \dots (9)$$

2.6. HUMEDAD DEL AIRE INTERIOR INFERIOR (2)

$$(w_{sti} - w_2)/rt + 2 \int Av Lai (w_{sd} - w_2)/(Ab(rs+ra)) + \\ + \int (w_{ss} - w_2)/r_{so} + h_{i2}(w_2 - w_1)/c_p = 0 \dots\dots\dots(10)$$

2.7. TEMPERATURA DE LAS PLANTAS

$$2h_p(Ta_2 - T_p) + (L_{dp}+L_{us}+L_{up}-L_{ds})/L_{ai} + (S_{dt}-S_{su}-S_{ut}-S_{sd})/L_{ai} + \\ + Q_r \eta_p \cdot Av / (L_{ai} \cdot Ab) - 2\lambda_f (w_{sp} - w_2)/(ra+rs) = V_v \cdot \rho_v \cdot c_w / Av \frac{\partial T_p}{\partial t} \dots\dots\dots(11)$$

2.8. TEMPERATURA DEL SUELO

La ecuación diferencial de conducción de calor en el suelo es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

con la condición de borde:

$$(L_{ds}-L_{us}) + (S_{sd} - S_{su}) + Q_r \eta_s (1 - (Av/Ab) + h_i(Ta_2 - T_s) + \\ + \lambda_f (w_2 - w_{ss})/r_{so} = - k_s \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots(12)$$

3. ENSAYOS

Los ensayos se llevaron a cabo en un invernadero demostrativo construido por el Grupo de Energía Solar del IFIR (UHR - CONICET), como uno de los proyectos demostrativos financiados por la Dirección Nacional de Conservación y Nuevas Fuentes de la Secretaría de Energía de la Nación que se encuentra ubicado en una unidad productiva del cinturón hortícola de Rosario. Dicho invernadero se dividió en dos partes a fin de comparar el uso de las P.T.A. con un ambiente testigo sin estas. Durante la realización de los ensayos se cultivaba tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en la etapa analizada los cultivos tenían una altura promedio de 0.80 m..

La pantalla utilizada consistió en un film de polietileno de 50 micrones de espesor, aluminizado en una de sus caras. Si bien la altura de las P.T. puede ser regulable en la etapa de ensayos analizada se ubicó a 1.20 m. de altura. Se prestó una especial atención a su hermeticidad. Luego de probar y analizar diversas técnicas de operación de las pantallas se optó por realizar su cierre 15 minutos antes de la puesta del sol y la apertura 1/2 hora después de la salida del sol, por ofrecer este sistema la mayor sencillez y eficiencia. Las mediciones de las variables ambientales externas e internas (temperatura, humedad, radiación solar) fueron realizadas durante 2 meses (julio y agosto).

4. SIMULACION

Para la simulación se realizó un programa que utiliza como datos de ingreso los valores de las condiciones primarias, tales como: radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad del aire exterior y los parámetros del sistema, las variables que dependen del tiempo fueron evaluadas en cada paso de tiempo. La Tabla I muestra los

valores de los parámetros usados en la simulación. Los parámetros correspondientes a las P.T.A. fueron medidos y evaluados según: Mijskens et al. 1984 y Mermier and Baille. 1988.

5. RESULTADOS

En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos durante un periodo de 24 horas (por motivos de claridad gráfica) de un análisis realizado durante tres días que fueron seleccionados por considerarlos representativos del período invernal en la región de Rosario. Se muestran la evolución de las temperaturas del aire exterior, del aire dentro del invernadero, sector testigo (sin P.T.A.) y del aire bajo las pantallas en el sector con P.T.A. y en la Fig 3 se presenta la evolución de las temperaturas medidas y simuladas del aire bajo las P.T.A.

Los resultados de los ensayos muestran claramente la utilidad de las P.T.A.. en el período de 3 días analizado se observó que bajo las P.T.A. la temperatura fue superior a 1 C. mientras que en el testigo la temperatura bajo de 0 C durante algo más de 20 horas, en los 3 días, llegando incluso a una mínima de -4,5 C. El total de horas en que el aire interior permaneció a temperaturas menores de 5 C fue de 26 horas en los 3 días, mientras que en el testigo llegó a 41,5 horas.

Si se hubiera querido suministrar calor mediante un equipo calefactor convencional para lograr la misma evolución de temperaturas que bajo las P.T.A. en medio invernadero (dimensiones en planta: 6 m. x 25 m.) se habrían consumido 180 KWh para esos 3 días y si el cálculo lo extendemos al invernadero completo y para los dos meses ensayados se habrían consumido 9.600 KWh.

La relación entre los valores simulados y medidos de temperatura bajo las P.T.A. (Fig. 3) muestran un considerable acercamiento y las dispersiones existentes pueden ser atribuibles a los errores de mediciones por una parte y a la inexactitud al evaluar ciertos parámetros del modelo.

En los valores de temperatura de suelo medidos y simulados la dispersión fue levemente mayor probablemente debido a una mayor inexactitud en las mediciones.

6. CONCLUSIONES

La modelización del sistema de P.T.A. dentro del invernadero demuestra una vez más que la modelización matemática es una herramienta confiable y que es posible predecir el grado de eficiencia de distintos materiales a usar como P.T.A. y distintas políticas de operación de las mismas.

La prestación de las P.T.A. en el mejoramiento del microclima del invernadero fue puesta en evidencia logrando ahorros sustanciales de energía y evitando contaminación ambiental y toxicidad en las plantas. Por otra parte al ser un sistema de bajo costo es fácilmente adaptable por los productores zonales.

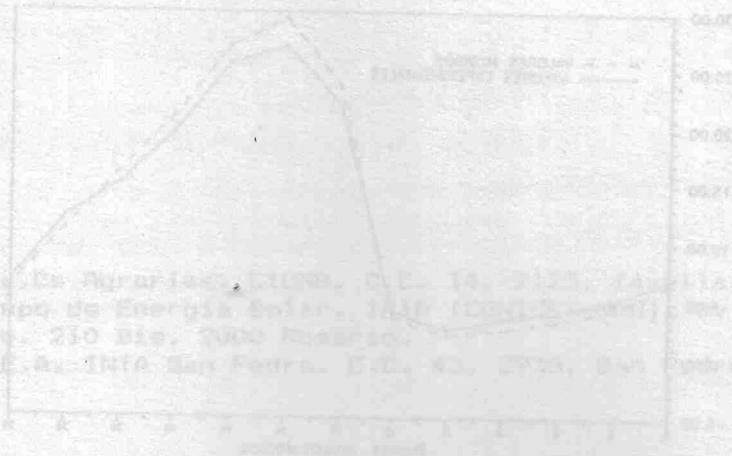
Sin embargo su manipulación (apertura y cierre) representa una labor adicional para el productor, quien además debe prestar atención en lograr una buena hermeticidad.

LISTA DE SIMBOLOS

a	altura de la canopia
Ab	área del piso del invernadero
Ac	área de la cubierta
Av	área cubierta por vegetación
cp	calor específico del aire
cv	calor específico de las plantas
h12	coef.transf. de cal. por filtrac e/ aire sub-inf
hi	coeficiente de transf. de calor del piso al aire interior
hf	coeficiente de transf. de calor de la cubierta al aire ext.
hp	coeficiente de transf. de calor de las plantas al aire interior
hs	coeficiente de transf. de calor de la cubierta al aire interior
ht	coeficiente de transf. de calor de la pantalla al aire interior
hv	coeficiente de transf. de calor por ventilación
kc	conductividad térmica de la cubierta
ks	conductividad térmica del suelo
kt	conductividad térmica de la P.T.A.
l	longitud característica de las hojas
L	longitud característica del invernadero
Lai	índice de área foliar
Ldc	radiación térmica descendente desde la cubierta
Ldp	radiación térmica descendente sobre las plantas
Lds	radiación térmica descendente sobre el piso
Ldt	radiación térmica descendente desde la P.T.A.
Lec	radiación térmica ascendente desde la cubierta
Let	radiación térmica ascendente desde la pantalla
Loc	radiación térmica descendente sobre la cubierta
Lot	radiación térmica descendente sobre la pantalla
Lut	radiación térmica ascendente hacia la pantalla
qt	flujo de calor por unidad área de pantalla y por unidad tiempo
rt	resistencia aerodinámica de la pantalla
Sd	radiación solar descendente desde la cubierta
Sdt	radiación solar descendente desde la pantalla
Su	radiación solar ascendente hacia la cubierta
Sut	radiación solar ascendente hacia la pantalla
Ta1	temperatura aire interior superior
Ta2	temperatura aire interior inferior
Tcs	temperatura del aire a la salida de los conductos
Te	temperatura externa
Tic	temperatura interior de la cubierta
Tit	temperatura interior de la pantalla
Tot	temperatura exterior de la pantalla
Tp	temperatura de las hojas
Ts	temperatura del piso
δt	espesor de la pantalla
λ	calor latente de vaporización del agua
ρ	densidad del aire
w1	humedad específica del aire interior superior
w2	humedad específica del aire interior inferior
wsto	humedad específica de saturación a la temperatura: Tot
wsti	humedad específica de saturación a la temperatura: Tit

REFERENCIAS

- Ansem, M.G.. 1986. Thermal screens in greenhouses diurnal variations in heat consumption. *J. agric. Engng. Res.*, 33(1):79-82.
- Arinze, E. A., Schoenau, G. J., Besant, R. W.. 1986. Experimental and computer performance evaluation of a movable thermal insulation for energy conservation in greenhouses. *J. agric. Engng. res.*, 34(2): 97-113.
- Chandra, P., Albright, L. D., 1980. Analytical determination of the effect on greenhouse heating requirements of using night curtains. *Trans. of the ASAE*, 23(4): 994-1000.
- Fuller, R. J., Meyer, C. P., Sale, P. J., 1987. Validation of a dynamic model for predicting energy use in greenhouses. *J. agric. Engng. Res.*, 38(1): 1-14.
- Levit, H. J., Gaspar, R., 1988. Energy budget for greenhouses in humid-temperate climate. *Agric. and Forest Meteorol.*, 42: 241-254.
- Meijer, J., 1980. reduction of heat losses from greenhouses by means of internal blinds with low thermal emissivity. *J. agric. Engng. Res.*, 25: 381-390.
- Mermier, M., Baille, A., 1988. The optical properties of plastics materials for greenhouse and screens. *Plasticulture*, 77: 11-24.
- Meyer, J., 1983. The effect of movable thermal screens on heat requirements of greenhouses. *Plasticulture*, 59: 13-23.
- Mougou, R., Mougou, A., Ben Mechlia, M., 1989. Comparative study of greenhouses covers with and without thermal screens. *Platiculture*, 81: 37-42.
- Nijskens, J., Deltour, J., Nisen, A., Coutisse, S., 1984. Propertes radiometriques et thermiques des materiaux plastiques. *Acta Horticulturae*, 154: 33-41.
- Nijskens, J., Deltour, J., Coutisse, S., Nisen, A., 1985. Radiation transfer through covering materials, solar and thermal screens of greenhouses. *Agric. and Forest Meteorol.*, 35: 229-242.
- Staley, L. M., Monk, G. J., Molnar, J. M., 1986. The influence of thermal curtains on energy utilization in glass greenhouses. *J. agric. Engng. Res.*, 33(2): 127-139.



(1) Fac. de Agronomía, UNBA, C.A. 18, 2127, San Juan, Argentina.
(2) Grupo de Energía Solar, IIAE (CONICET), Av. 37 de Febrero, 210 Bis, 2000 Rosario.
(3) E.C.A., INTA San Pedro, C.A. 2714, San Pedro.

FIGURA 1: Esquema ilustrativo de la instalación de una P.T.A.

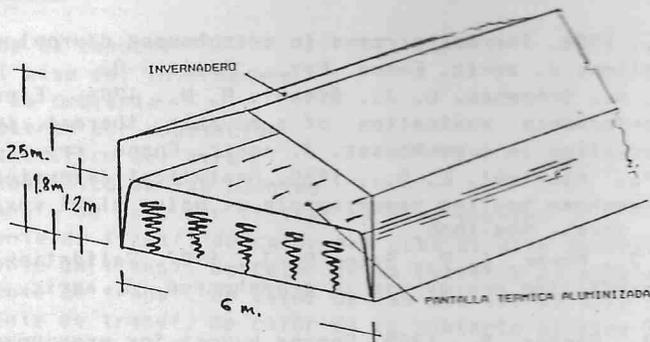


FIGURA 2: Temperaturas medidas del aire exterior, del aire en el sector testigo del invernadero (sin P.T.A.) y del aire bajo las pantallas en el sector con P.T.A.

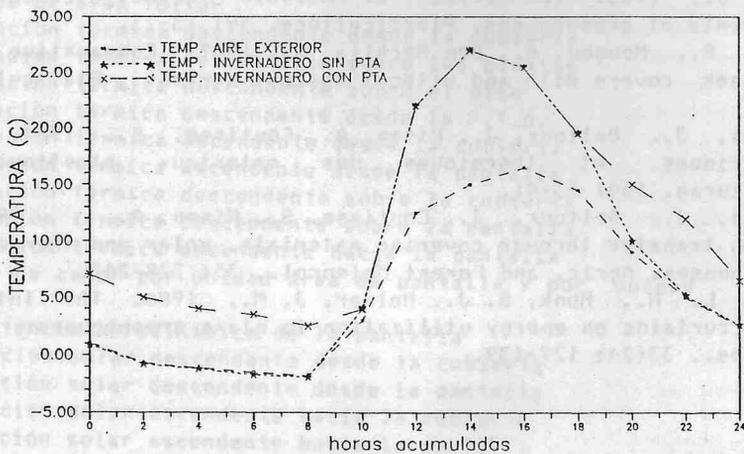


FIGURA 3: Temperaturas del aire simuladas y medidas en el sector con P.T.A.

