

EVALUACION DE PLASTICOS PARA INVERNADEROS

E.M. SIERRA, SUSANA ORDEN, MARTHA GOLDBERG y LIBERTAD MASCARINI

Recibido: 12/10/93

Aceptado: 10/03/94

RESUMEN

Dentro del Programa de Investigación UBACYT AG044 orientado a la optimización del diseño de invernáculos, y en el que participan docentes de las Cátedras de Climatología y Fenología Agrícolas, de Floricultura y de Física de la Facultad de Agronomía UBA, se ha puesto en funcionamiento un laboratorio de evaluación de plásticos para la agricultura. En este trabajo se comparan la transparencia a la radiación solar y a la radiación de onda larga de películas de polietileno y placas de policarbonato, con los valores correspondientes al vidrio. Los polietilenos, especialmente los de tipo cristal, presentan alta transparencia a la luz pero baja retención de onda larga, lo que limita su eficacia en lo que hace a generar un efecto de invernadero. Los policarbonatos combinan propiedades muy similares a las del vidrio, con una baja conductividad térmica y una alta resistencia estructural.

Palabras clave: Plásticos, invernadero, evaluación.

GREENHOUSES PLASTIC EVALUATION

SUMMARY

As a part of the AGO44 UBACYT Research Program, aimed to optimize greenhouse design, a laboratory for evaluation of plastics for agriculture has been implemented. In this paper, transparency coefficients, to solar and long wave radiation, of polyethylene films and polycarbonate sheets were compared to the value corresponding to a glass sheet. Polyethylene films, specially those of the crystal type, showed a great degree of transparency to solar radiation but a low retention of long wave radiation, then becoming inefficient as greenhouse effect generators. Polycarbonate sheets combine properties nearly identical to those of glass sheets with a low thermal conductivity and high structural resistance.

Key words: Plastics, greenhouse, evaluation.

INTRODUCCION

Dentro del Programa de Investigación UBACYT AGO44, orientado a la optimización de diseño de invernaderos se está poniendo en funcionamiento un laboratorio para la evaluación de plásticos para la agricultura.

La diversidad de calidades y procedencias de los plásticos para invernaderos, que se emplean actualmente en la Argentina, hacen necesario el desarrollo y ajuste de métodos de evaluación de sus propiedades, dado que los usuarios no disponen aún de fuentes objetivas de información que les permitan validar los datos proporcionados por los proveedores.

Existen trabajos realizados en el extranjero, (Favali, 1966), (Nisen, 1978); (Seginer *et al.* 1988) o aplicados a una determinada región de su país (Castejón, 1991).

Las propiedades de los plásticos se pueden agrupar en tres tipos: ópticas, mecánicas y de resistencia al envejecimiento.

Entre las ópticas, las más importantes son la transparencia a la radiación de onda corta emitida por el sol, necesaria para la fotosíntesis, y a la radiación térmica emitida por el suelo, la cubierta vegetal y la estructura del invernadero. La combinación de una alta transparencia a la radiación de onda corta y de una baja transparencia a la radiación de onda larga es lo que se denomina efecto invernadero. De este modo, penetra en el invernadero un alto porcentaje de radiación solar pero sólo puede escapar una pequeña proporción de la radiación terrestre proveniente del suelo y de la cubierta vegetal, que queda dentro del invernadero, manteniendo una temperatura superior a la del exterior y protegiendo a los cultivos de las temperaturas mínimas.

Entre las propiedades mecánicas, la resistencia a la tracción, a la flexión, al desgarre, al impacto, etc, deben tenerse en cuenta en el diseño y armado del invernadero. (Lagier, 1991)

Dentro del tercer grupo de propiedades se destaca la velocidad de degradación por acción de los rayos U.V. del sol que provocan la oxidación y consecuente pérdida de transparencia de los materiales (Matallana González A., 1989).

En el presente trabajo, por tratarse de la primera aproximación al tema llevada a cabo por este grupo de investigación, se comenzó por las propiedades ópticas, que son las más directamente relacionadas con el comportamiento físico del invernadero y con su capacidad de mantener un activo ritmo fotosintético en su interior (Martínez *et al.* 1992).

MATERIALES Y METODOS

Plásticos evaluados

Se utilizaron muestras de plásticos de distintas procedencias, espesores y tratamientos, comercializados en la Argentina (Cuadro N°1). Por tratarse de un

trabajo de investigación no se consideró oportuno revelar los datos comerciales de las muestras, razón por la que aparecen codificadas.

Las muestras 1 a 7 corresponden a distintos tipos de polietilenos y las muestras 8 a 12, pertenecen a policarbonatos. La muestra 8 es un policarbonato compacto, mientras que las del número 9 en adelante poseen estructuras alveolares unidas por costillas transversales.

Bases Teóricas

Transparencia de los plásticos a la Radiación Solar de onda corta (0,36 μm - 2,50 μm)

Se denomina transparencia a la propiedad de un material de dejar pasar la mayor cantidad posible de radiación solar (visible y no visible). Según la ley de Lambert el porcentaje relativo de radiación de onda corta transmitida depende de la naturaleza del material utilizado como absorbente y de su espesor, tomándose en este estudio la expresión que figura en la obra de Glasstone (1968)

$$I = I_0 e^{-ax} \quad (1)$$

donde I es la intensidad de la radiación transmitida, I_0 la intensidad incidente expresadas en W/m^2 , a el coeficiente de atenuación en mm^{-1} y x el espesor de la lámina en mm. Considerando una lámina de espesor $x = 1/a$, resulta:

$$I = I_0 e^{-1} \quad \text{o sea } I/I_0 = e^{-1} = 0,367$$

por lo tanto, el coeficiente de atenuación a puede interpretarse como igual a la inversa del espesor que debe tener una lámina de ese material para que la intensidad transmitida sea el 36,7 % de la intensidad incidente.

Aplicando logaritmos naturales en (1) resulta (2)

$$\ln I = \ln I_0 - a x \quad (2)$$

Para determinar experimentalmente el coeficiente de atenuación se calculó, por regresión lineal, la pendiente de la recta (2), obtenida al ajustar el logaritmo natural de la intensidad de la radiación transmitida en función del espesor del absorbente. Los distintos valores de x se lograron superponiendo láminas de espesor uniforme del material en estudio.

Transparencia de los plásticos a la radiación de onda larga (3 μm - 35 μm)

En un recinto adiabático, lleno de aire a una temperatura mayor que la del ambiente exterior y conectado térmicamente con éste por medio de una ventana, la cantidad de calor que el recinto pierde por unidad de tiempo está dada por la ecuación (3) que figura en la obra de Keith Cornwell (1985).

$$\delta Q/d\tau = k S (t - t_a) \quad (3)$$

donde k es el coeficiente de transmisión total expresado en $\text{W/m}^2\text{°C}$, S el área de la ventana en m^2 , t la temperatura interior del recinto en $^{\circ}\text{C}$, t_a la temperatura ambiente en $^{\circ}\text{C}$ y τ el tiempo en segundos. El coeficiente de transmisión total queda expresado por (4), según figura en la obra de Isachenko. (1969)

$$k = (1/h_1 + 1/h_2 + x/\lambda)^{-1} \quad (4)$$

donde h_1 es el coeficiente de convección expresado en $\text{W/m}^2\text{°C}$ del aire en el interior del recinto, h_2 el coeficiente de convección del exterior, en las mismas unidades, λ la conductividad térmica expresada en $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$, del material del que está hecha la ventana y x su espesor en m.

La cantidad de calor que el recinto pierde por unidad de tiempo también puede expresarse como (5):

$$\delta Q/d\tau = -C dt/d\tau \quad (5)$$

donde C es la capacidad calorífica, expresada en $\text{J/}^{\circ}\text{C}$, del recinto y su contenido.

Igualando (3) y (5) obtenemos la ecuación diferencial (6)

$$-C dt/d\tau = k S (t - t_a) \quad (6)$$

Esta ecuación diferencial no tiene solución analítica exacta y se resuelve utilizando métodos numéricos, ajustando los valores experimentales con una función de la forma (7):

$$(t - t_a) = (t_0 - t_a) \exp\{-\alpha\tau(1 + A\tau + B\tau^2 + \dots)\} \quad (7)$$

donde $\alpha = kS/C$ es el coeficiente de pérdida expresado en s^{-1} , t_0 la temperatura inicial del recinto y A , B y ... son coeficientes a determinar.

Para tiempos pequeños y suponiendo que la capacidad calorífica del recinto y su contenido es despreciable

frente a la del medio exterior y que la temperatura ambiente y el coeficiente de transmisión total se mantienen constantes durante el enfriamiento, puede tomarse como solución una función exponencial de la forma (8)

$$t - t_a = (t_0 - t_a) e^{-\alpha\tau} \quad (8)$$

Considerando un tiempo $\tau = 1/\alpha$ de (8) resulta (9)

$$\{(t - t_a)/(t_0 - t_a)\} = e^{-1} = 0.367 \quad (9)$$

Por lo tanto $1/\alpha$ puede interpretarse como el tiempo en el que la diferencia de temperatura del recinto con el ambiente se reduce al 36.7 % de su valor inicial.

Aplicando logaritmos naturales en (8) resulta (10)

$$\ln(t - t_a) = \ln(t_0 - t_a) - \alpha\tau \quad (10)$$

Para determinar el coeficiente α de pérdida, se calculó, por regresión lineal, la pendiente de la recta (10) que resulta de ajustar el logaritmo natural de la diferencia de temperatura entre el recinto y el ambiente en función del tiempo.

De la expresión $\alpha = kS/C$ resulta $k = \alpha C/S$, por lo tanto un material menos transparente a la radiación térmica tendrá a igualdad de las demás condiciones un coeficiente de transmisión menor y el recinto que limita se enfriará más lentamente.

Métodos de evaluación

Para medir la transparencia de los plásticos a la radiación de onda corta se empleó una lámpara de Cuarzo-Iodo (facilitada por el Servicio Meteorológico Nacional) cuyo espectro de emisión se aproxima al solar, alimentada por una fuente de tensión estable para mantener la radiación incidente constante. La radiación transmitida se midió con un piranómetro LI-200SA provisto de un fotodiodo de silicio y acoplado a un milivoltímetro digital. Un banco óptico convencional sirvió de soporte al equipo que se montó en un cuarto oscuro.

Para la evaluación de la transparencia a la radiación de onda larga se utilizó una cavidad aislada térmicamente del medio exterior, de manera que pudiera enfriarse solamente a través de una ventana, en la que se colocaban los materiales en estudio, empleándose una lámina de vidrio de 3 mm de espesor como patrón de comparación.

La cavidad se calentó mediante una resistencia

Cuadro N°1: Muestras de plásticos de diferentes procedencias, espesores y tratamientos.

Muestra	Descripción	Espesor (μ)	Procedencia
1	PETérmico	100	1001
2	PETérmico	150	1001
3	PETérmico	200	1001
4	PETérmico	100	1002
5	PETérmico	150	1002
6	PECristal	100	1001
7	PECristal	200	1002
8	Policarbonato Cristal compacto.	100	1003
9	Policarbonato Cristal alveolar.	6000	1003
10	Policarbonato Bronce alveolar	6000	1003
11	Policarbonato Bronce alveolar	10000	1003
12	Policarbonato Cristal alveolar	6000	1004

eléctrica ubicada en su interior, alimentada por una fuente de tensión continua regulable. Las mediciones se iniciaron cuando la temperatura del aire en la cavidad era de 20 °C superior a la temperatura ambiente.

Dado que el coeficiente de pérdida no sólo depende de la transparencia a la radiación de onda larga sino también de la geometría, capacidad calorífica y coeficiente de transmisión total del sistema, sus valores no son comparables si las medidas no son efectuadas siempre con las mismas condiciones convectivas o sea el aire del interior y exterior en reposo y a igual temperatura.

A los efectos de comparar medidas realizadas con temperatura ambiente diferentes se calcularon los coeficientes de pérdida relativos al vidrio α/α_v , los que resultaron constantes para variaciones de temperatura ambiente del orden de 10°C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 ilustra el procedimiento seguido para la determinación del coeficiente de atenuación de la radiación de onda corta, permitiendo observar la variación del logaritmo del cociente entre la intensidad de la radiación transmitida (I) y la incidente (I_0), en función del espesor de absorbente, modificado por superposición de lá-

Cuadro N°2: Valores medios del coeficiente de atenuación para diferentes muestras

Muestra	Coefficiente de atenuación (mm ⁻¹)	Porcentaje de varianza explicada
Vidrio	0,006 ± 0,01	98,9
1, 2 y 3	1,98 ± 0,02	98,5
4 y 5	1,40 ± 0,02	98,3
6	0,76 ± 0,01	99,6
7	0,76 ± 0,01	99,6
8	0,10 ± 0,01	97,5

minas de polietileno térmico de 150 micrones (Muestra N° 2), así como la recta de regresión correspondiente. En el Cuadro 2 se exhiben los valores medios del coeficiente de atenuación para el vidrio, y para las restantes muestras, y los porcentajes de varianza explicados por las respectivas rectas de regresión.

Independientemente de su procedencia, los polietilenos cristal tienen un coeficiente de atenuación que es aproximadamente la mitad de los polietilenos térmicos de igual espesor. Para polietilenos del mismo tipo los coeficientes de atenuación de cada procedencia son ligeramente diferentes para los distintos espesores, lo cual puede deberse a variaciones en los procesos de fabricación de cada partida utilizada.

Dado que para los policarbonatos alveolares no puede calcularse el coeficiente de atenuación por

Cuadro N° 3: Porcentajes de radiación transmitida

Muestra	I/I ₀ (%)
Vidrio	94
1	82
2	74
3	67
4	81
6	91
7	82
8	90
9	79
10	56
11	52
12	90

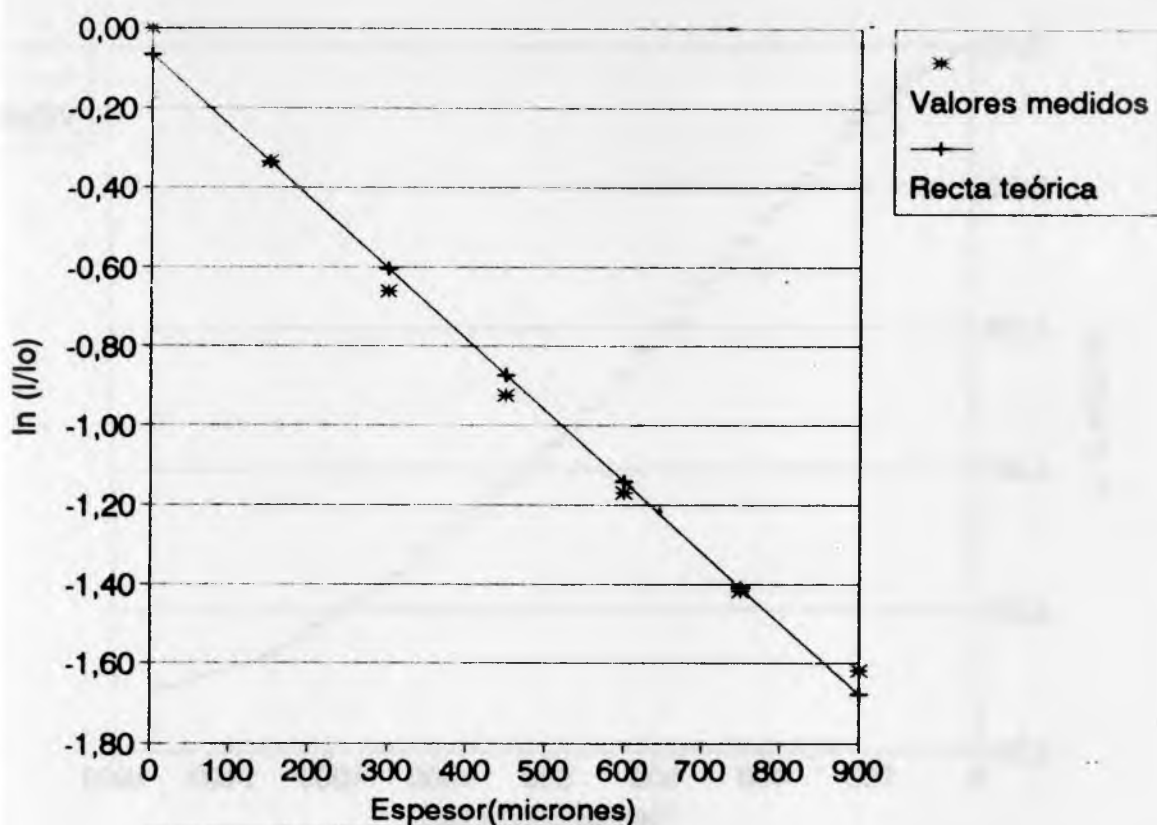


Figura 1. Radiación Transmitida

tratarse de medios no homogéneos, a fin de poder efectuar una comparación de todas las muestras, se midieron los correspondientes porcentajes de luz transmitida. (Cuadro N°3).

Cabe destacar el excelente comportamiento de las muestras 8 (Policarbonato cristal compacto) y 12 (Policarbonato cristal alveolar de 6 mm) que igualan los valores de transmisión de los polietilenos cristal. Sin embargo llama la atención el bajo nivel de transmisión registrado por la muestra 9, que responde a la misma descripción que la muestra 12, por lo que puede inferirse que materiales de este tipo pueden diferir mucho según su procedencia.

La Figura 2 ilustra el procedimiento seguido para la determinación de la transparencia a la radiación de onda larga, presentando la variación temporal del logaritmo del cociente entre los valo-

res de la diferencia de temperatura entre el recinto y el ambiente, y el valor inicial de dicha diferencia, para un recinto limitado por la lámina de vidrio. Puede observarse que los valores experimentales se ajustan a la función teórica (8) para tiempos pequeños, lo que permite utilizar dicho tramo de curva como estimador de la transmisión de onda larga a través del cálculo de la constante de pérdida α . Los valores de alfa para las distintas muestras figuran en el Cuadro N°4, en el que también se incluye el coeficiente de pérdida relativo al vidrio, obtenido como el cociente entre el valor correspondiente a cada material y el de este último. Los altos porcentajes de varianza explicados ponen de manifiesto el buen ajuste de los valores medidos a las funciones propuestas.

La transparencia de los polietilenos a la radiación térmica varía muy poco en función del espe-

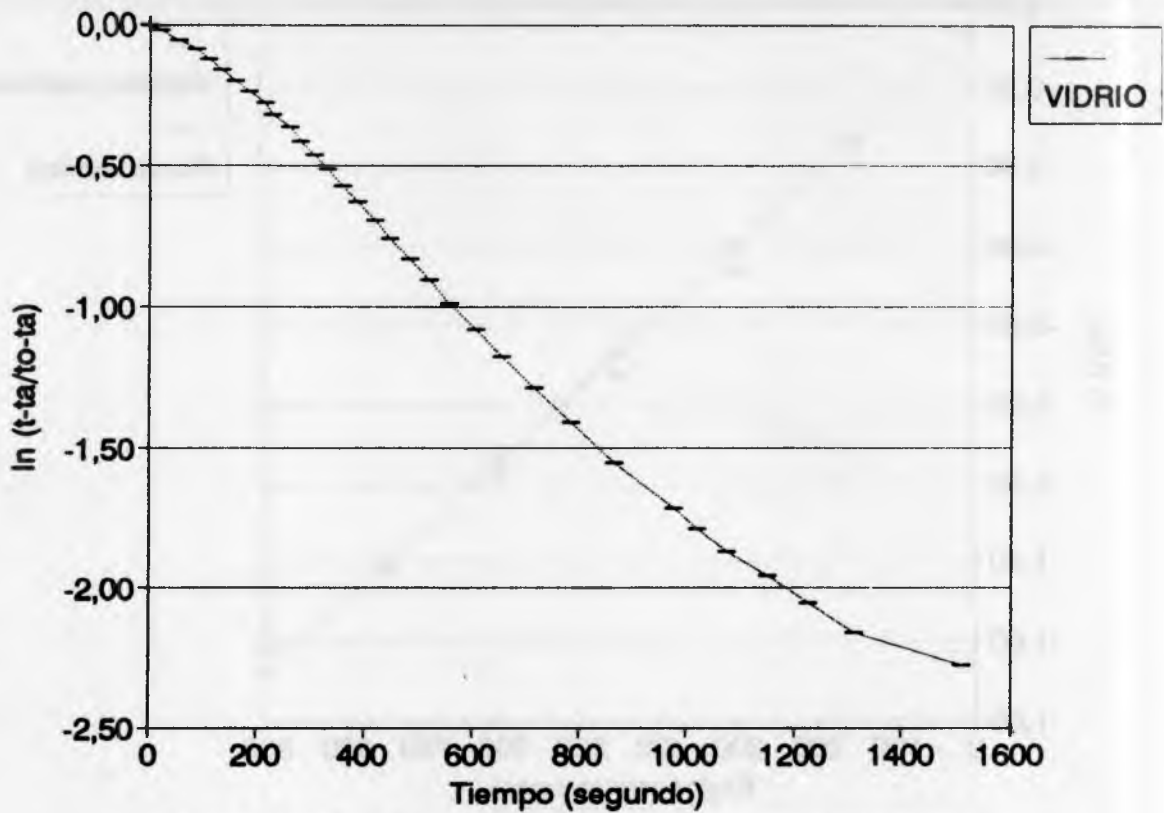


Figura 2. Curva de enfriamiento.

Cuadro N° 4: Valores medios del coeficiente de pérdida, su inversa y el relativo al vidrio.

Muestra	Coefficiente α de pérdida ($10^{-4} \cdot s^{-1}$)	$\tau=1/\alpha$ (min)	Porcentaje de varianza explicable	Coefficiente de pérdida relativo al vidrio
Vidrio	21,9 + 0,2	7,61	99,5	1
11	21,3 + 0,2	7,82	98,7	0,97 ± 0,02
10	22,8 + 0,2	7,31	99,2	1,04 ± 0,02
9	22,9 + 0,2	7,28	99,3	1,04 ± 0,02
12	22,8 + 0,2	7,31	99,5	1,04 ± 0,02
3	23,1 + 0,2	7,21	98,7	1,05 ± 0,02
2	23,2 + 0,2	7,18	99,3	1,06 ± 0,02
8	23,5 + 0,2	7,09	99,5	1,07 ± 0,02
7	24,0 + 0,2	6,94	99,6	1,09 ± 0,02
1	24,3 + 0,2	6,86	99,5	1,10 ± 0,02

sor, poniendo de manifiesto su baja eficiencia en este aspecto en el que contribuye poco al efecto de invernadero. No obstante, al impedir la pérdida de energía por convección, que es un proceso de mayor magnitud que la pérdida por irradiación de onda larga, el polietileno consigue un efecto de la misma escala que el producido por el vidrio. Como puede comprobarse al comparar los tiempos necesarios para que la diferencia entre la temperatura interior y la ambiente disminuya a 36,7 % de su valor inicial. Queda claro que un recinto limitado por una película de polietileno de cualquier tipo o espesor se enfría apenas un poco más rápido que uno limitado por vidrio. Se pone asimismo de manifiesto que el polietileno térmico tiene un efecto de abrigo ligeramente mayor que el cristal de igual espesor.

Las muestras de policarbonatos poseen características térmicas muy semejantes a las del vidrio. Esto pone en evidencia la interesante potencialidad de estos materiales que en el caso de los de tipo cristal combinan: alta transparencia a la luz, baja transparencia a la onda larga, capacidad aislante frente a las pérdidas por convección y alta resistencia unida a una capacidad de actuar como elementos estructurales del invernadero.

CONCLUSIONES

Los polietilenos, especialmente los de tipo cristal, presentan una capacidad de transmitir la radiación solar comparable a la del vidrio, pero sus mayores coeficientes de pérdida de radiación de onda larga les otorgan una menor capacidad de generar un efecto invernadero. Sin embargo, su capacidad de contener las pérdidas por convección, hace que pueda esperarse de ellos prestaciones similares a las del vidrio.

Los policarbonatos bronce registran bajos niveles de transmisión de radiación solar, lo que podría constituir un problema en invierno, pero posiblemente no en verano. Por otro lado, su bajo coeficiente de pérdida de onda larga, su capacidad aislante a la conducción y su resistencia estructural los convierte en materiales muy interesantes, aunque de mayor costo.

Los policarbonatos cristal, aparecen como materiales sumamente eficaces, con las mismas prestaciones que el vidrio pero con menos vulnerabilidad al impacto y a la fuerza del viento gracias a su flexibilidad.

BIBLIOGRAFIA

- MATALLANA GONZALEZ, Antonio. 1989. Invernaderos. Diseño, Construcción y Ambientación. 160 pp
- GLASSTONE, SAMUEL. 1968. Tratado de Química Física. 1179 pp.
- CORNWELL, KEITH. 1981. Transferecia del Calor . 299 pp.
- ISACHENKO V., V.OSIPOVA and A. SUKOMEL. 1969. Heat Transfer .551 pp.
- FAVALI,R. 1966 Materie plastiche a fotoselecttivita specifica per la copertura delle serre. *II Congresso Internazionale de Plásticos en Agricultura*.Pisa.
- NISEN, A. 1978 Propietés photométriques des plastiques utilisés en couverture d'abris. *Plasticulture*. 40 : 1-15.
- SEGINER,I.; D. KANTZ; U. M. PEIPER; N.LEVAV. 1988 Transfer coefficients of several polyethylene greenhouse covers. *Journal of Agricultural Engineering Research* 39:19-37.
- SEGINER,I.; D. KANTZ. 1988 In-situ determination of transfer coefficients for heat and water vapour in a small greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 35:39-54.
- LAGIER,J. 1991-92 Choice of flexible cladding materials in relation to greenhouse and plants grown. *Plasticulture*, 90:33-34.1991/92.
- MARTINEZ,P.F.;B.BIMBO 1992.Materiales plásticos para cubiertas de invernaderos.Datos para la selección y efecto sobre los cultivos. *Horticultura* 79:13-31.
- CASTEJON, J.A. Transmisión de radiación solar:aplicación a los invernaderos de Cataluña. 129 pp. Proyecto Fin de Carrera. ETSIA-Lérida.