

EVALUACIÓN DE MALLAS DE SOMBREADO PARA OPTIMIZAR LA VENTILACIÓN NATURAL Y LA LUMINOSIDAD EN EL INTERIOR DE UN INVERNADERO

ANA MARÍA LANDINI¹; SUSANA ORDEN¹; MARTHA GOLDBERG¹; F. VILELLA²;
LUCILA BOTTINI¹ y MARTA CABEZAS³

Recibido: 22/05/03

Aceptado: 11/02/04

RESUMEN

Se evaluó, para mallas de rafia negras y coloreadas de diferentes transmitancias, la influencia de la porosidad sobre la ventilación en el invernadero y la uniformidad lumínica sobre una superficie que simulaba el canopeo. Para obtener la porosidad de estas mallas de orificios irregulares, se empleó una curva de porosidad en función de la transmitancia a la luz, obtenida a partir de un juego de cuadrículas de orificios regulares. Se calculó la permeabilidad al aire de las mallas aplicando la ley de Darcy y se observó que aumentó cuadráticamente con la porosidad ($R^2 = 0,97$), en el rango de porosidad utilizado. Si se desea reducir la temperatura del aire de un invernadero incrementando el porcentaje de sombra, deberá tenerse en cuenta que una disminución en la porosidad perjudica la ventilación. Se observó que para distancias mayores que 1,73 m, la distribución de intensidad de luz en el canopeo fue uniforme, independiente de la porosidad, del ancho de la hebra y de la distancia de la malla al follaje. A partir de la porosidad y la permeabilidad de la malla es posible seleccionar aquella que mejor concilie los procesos de sombreado y ventilación con la distribución de luz en el cultivo.

Palabras clave. Invernadero, permeabilidad al aire, intensidad de luz.

EVALUATION OF SHADING MESHES TO OPTIMIZE THE NATURAL VENTILATION AND THE LUMINOSITY INSIDE A GREENHOUSE

SUMMARY

The influence of porosity and the shading percentage upon ventilation and the uniformity of light over a surface which simulated a canopy, for black and colored plastic shading meshes of different transmittance, were tested. To obtain the porosity of the meshes of irregular orifices, a curve with porosity as a function of light transmittance, from a set of grids of regular orifices, was used. Applying Darcy's law in the range of porosity used, our results showed that the air permeability increased in a quadratic form with that one ($R^2 = 0,97$). If the shading percentage is increased in order to decrease the greenhouse air temperature, this fact might reduce the permeability. We have observed that the light distribution on the canopy was uniform, independently of the porosity, wide of the thread and distance between the canopy and the meshes, for distances longer than 1,73 m. So, it is possible to select the mesh porosity and permeability that optimize the processes of shading and ventilation with a uniform distribution of light intensity on the canopy, simultaneously.

Key words. Greenhouse, air permeability, light intensity.

¹Cátedra de Física, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453,(1417) Buenos Aires, Argentina.

²Cátedra de producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453,(1417) Buenos Aires, Argentina.

³Cátedra de Botánica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires Av. San Martín 4453,(1417) Buenos Aires, Argentina.

INTRODUCCIÓN

En una determinada localidad, las condiciones climáticas dentro de un invernadero sin control ambiental dependen fuertemente de las características del flujo de aire y del porcentaje de sombreado (Andersson y Skov, 1991). La ventilación contribuye al control de la temperatura, la humedad y la concentración de gases (como el CO₂) del aire del interior y, consecuentemente, influye fuertemente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Castilla, 1994; Bailey, 1995; Kittas *et al.*, 1995; Boulard *et al.*, 1995; Mistriotis *et al.*, 1997). Descartada la ventilación mecánica por presentar mayores costos energéticos y de mantenimiento (Mistriotis *et al.*, 1997), la ventilación natural es el método más utilizado, económico y práctico para brindar condiciones microclimáticas favorables para el cultivo, durante el período estival e invernal (Boulard *et al.*, 1995; Montero *et al.*, 1996; Papadakis *et al.*, 1996). Las características del flujo de aire a través de las mallas de sombreado, pueden ser evaluadas a partir de determinaciones de la permeabilidad de las mismas al aire, mediante la ley de Darcy, que relaciona la transferencia unidireccional de volumen de fluido por unidad de tiempo con el gradiente de presión a través de un material poroso (Miguel *et al.*, 1997). La temperatura final del aire de un invernadero depende entre otros aspectos de las propiedades radiométricas de las mallas y de su permeabilidad al aire, la cual representa la resistencia a la ventilación natural (Andersson y Skov, 1991). El porcentaje de sombreado de una malla para cultivos protegidos, se elige de tal forma que los mismos reciban una cantidad de radiación cercana al punto de saturación lumínica establecido para la especie y de modo tal que el flujo luminoso se distribuya uniformemente sobre ellos (Montero *et al.*, 1993). Una malla de color de igual transmitancia que una negra tiene una densidad superficial de masa mayor (Orden *et al.*, 1997), lo que reduce la permeabilidad al aire y, por lo tanto, la ventilación (Orden *et al.*, 2001).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron ocho mallas de sombreado coloreadas (dos azules y una verde) y no coloreadas (cuatro negras y una blanca), de distintas transmitancias, fabricadas en la Argentina. El tipo de tejido fue de puntos por urdimbre, con hebras de rafia de diferente ancho y espesor.

Transmitancia a la radiación luminosa

La transmitancia a la radiación fotosintéticamente activa (RFA) de las mallas se calculó según las normas de la American Society Testing of Materials (ASTM D1003, 1977). La luz proveniente de una lámpara halógena de tungsteno se condujo por un tubo colimador al diafragma de entrada de una esfera integradora cuyo interior es una superficie difusora perfecta. La transmitancia luminosa (T) se define como:

$$T = I_2 / I_1$$

donde I₁ e I₂ son las intensidades de la radiación en el interior de la esfera, con el diafragma sin malla y con malla, respectivamente. Las intensidades fueron medidas con un radiómetro (LI-190SA), marca LI-COR, Lincoln, NE, U.S.A., ubicado sobre la esfera en ángulo recto a la dirección de la luz incidente.

El porcentaje de sombreado (S_g) se calculó como:

$$S_g = (1 - T) 100$$

Porosidad de las mallas

La porosidad (P) de las mallas se define como la fracción del área de la muestra (A_m) ocupada por el área total de orificios (A_o) y se expresa como:

$$P = A_o / A_m$$

Se utilizó un método indirecto para calcular la porosidad de las mallas de rafia, debido a la forma y tamaño irregulares de sus orificios. Para ello, en el Laboratorio de la Cátedra de Física de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, se diseñó por medio de la computadora un juego de siete cuadrículas uniformes, de 10 x 10 cm, que impresas en negro, sobre láminas transparentes presentaron diferentes transmitancias a la luz. La porosidad de las cuadrículas impresas se calculó como la fracción transparente del área total, en razón de su geometría regular. Se trazó el gráfico de porosidad *versus* transmitancia, el cual se empleó como curva de calibración para determinar la porosidad de las mallas de rafia. Las de color se pintaron de negro para evitar el pasaje de la luz a través de los hilos, transparentes a la radiación.

Permeabilidad al aire de las mallas

La permeabilidad de un medio poroso está relacionada con la mayor o menor resistencia que éste presenta al movimiento de un fluido a través de él.

Se calculó la permeabilidad al aire de las mallas a partir de la ley de Darcy para flujo unidimensional. Ésta

relaciona el caudal de volumen (Q) que pasa a través de una superficie perpendicular al flujo, con el gradiente de presión ($\frac{\partial p}{\partial x}$) en la dirección del movimiento, según la ecuación:

$$Q = \frac{k}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} A_m$$

donde A_m es el área de la muestra perpendicular al flujo, k la permeabilidad del medio poroso y ρ el peso específico del fluido. El caudal Q se puede expresar como: $Q = A_m v$, donde v es la velocidad media del fluido en A_m .

Combinando estas dos últimas ecuaciones, v puede expresarse como:

$$v = \frac{k}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

La permeabilidad intrínseca o geométrica del medio (k_o) se relaciona con la permeabilidad (k), a través de la siguiente expresión:

$$k = k_o \rho / \eta$$

donde η es el coeficiente dinámico de viscosidad del aire. Sustituyendo ésta última en la ecuación anterior, resulta:

$$k_o = -v \eta \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

Para calcular la permeabilidad intrínseca k_o a partir de estas magnitudes, se utilizó un diseño experimental constituido por un generador de aire en cuya corriente se ubicó la malla, la cual abarcó toda la boca de salida de aquél (Figura 1). Por el principio de conservación del caudal se cumple que: $A_m v = A_o v_i$, donde v_i es la velocidad del fluido a través de cualquier orificio de la

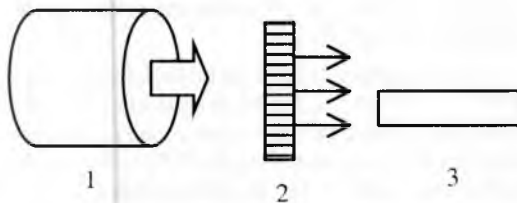


FIGURA 1. Esquema del diseño experimental para determinar la permeabilidad al aire de las mallas. 1. generador de aire; 2. malla de sombreado; 3: tubo de Pitot.

malla. Por lo tanto, la velocidad media se calculó como $v = P v_i$, donde P es la porosidad. Para determinar la velocidad v_i se utilizó un tubo de Pitot (Sears *et al.*, 1972), el cual posee dos orificios, uno orientado perpendicular a la dirección del flujo de aire, y el otro paralelo, conectados ambos a las ramas de un manómetro de alcohol (Figura 2). Se determinó v_i a partir del desnivel h entre ambas ramas por la expresión: $v_i = \sqrt{2gh}$, donde g es la aceleración de la gravedad.

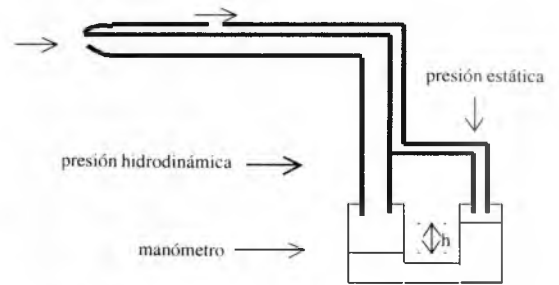


FIGURA 2. Detalle del tubo de Pitot y manómetro.

El gradiente de presión ($\frac{\partial p}{\partial x}$) a través de la malla en la dirección del flujo, se calculó como el cociente entre la caída de presión estática a través de la malla y el espesor de la misma. Dicha caída de presión se determinó conectando sólo el orificio lateral del tubo de Pitot al manómetro de alcohol. La diferencia de presión manométrica a ambos lados de la malla, se midió por la diferencia de los desniveles obtenidos en el manómetro de alcohol utilizado, cuando se coloca el Pitot antes y después de la malla.

Distribución de la intensidad de luz sobre el canopeo

Para encontrar la porosidad que mejor concilie el efecto de luminosidad uniforme con la máxima ventilación, se evaluó la distribución de la intensidad de luz transmitida por las mallas sobre un plano perpendicular al flujo de luz, el cual simula con ciertas restricciones la cama de siembra. Para ello con una lámpara de tungsteno de 500 W apropiadamente colimada, se iluminó la malla y se desplazó ésta en dirección perpendicular a la luz emitida, a intervalos de 0,5 cm hasta completar el ancho de la misma. Para cada paso se midió la luz transmitida con un radiómetro marca LI-COR, (LI 190), Lincoln, NE, U.S.A. Se repitió la experiencia para diferentes distancias entre la malla y la pantalla.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro N° 1 se muestran los porcentajes de transmitancia luminosa y los de sombreado de las mallas, como así también el ancho y espesor de la hebra de rafia.

CUADRO N°1. Porcentajes de transmitancia (T%) y de sombreado (S%) de mallas con hebras de rafia de ancho (a) y espesor (e).

Mallas	Denominación	a (cm)	e (cm)	T%	S%
Blanca	B	0,216	0,068	65	35
Negra 1	N ₁	0,150	0,071	45	55
Negra 2	N ₂	0,180	0,093	38	62
Azul 1	A ₁	0,100	0,071	30	70
Verde	V	0,100	0,085	30	70
Negra 3	N ₃	0,120	0,067	20	80
Azul 2	A ₂	0,110	0,063	18	82
Negra 4	N ₄	0,210	0,057	15	85

Para las cuadrículas diseñadas por computadora e impresas en láminas transparentes, el porcentaje de porosidad (P%), calculado a partir del área de los agujeros regulares, en función del porcentaje de transmitancia (T%) resultó $P = 1,0595 T + 2,4053$ con $R^2 = 0,99$. A partir de esta función de calibración se calcularon los porcentajes de porosidad de las mallas de rafia. En el Cuadro N° 2 se muestran dichos porcentajes.

CUADRO N° 2. Porcentajes de porosidad (P%) y de sombreado (S%) de las mallas de rafia.

Mallas	P%	S%
B	30	35
N ₁	50	55
N ₂	42	62
A ₁	24	70
V	14	70
N ₃	23	80
A ₂	14	82
N ₄	19	85

Se observa que al incrementar el porcentaje de sombreado, para mallas del mismo color, disminuye la porosidad, como resultado de una densidad superficial de masa mayor. Cuando se comparan mallas de diferente color no siempre un mayor porcentaje de sombra está relacionado con una menor porosidad debido a que los hilos de rafia de color tienen distinta transmitancia a la radiación luminosa. Por ejemplo, las malla A₁ y V tienen el mismo porcentaje de sombreado pero la porosidad de la A₁ es mayor, ya que sus hilos son menos transparentes. Es decir que para alcanzar iguales valores de sombreado la A₁ necesita menor densidad superficial de masa y en consecuencia es más porosa. Esto justifica también que mallas de color de igual porosidad no tengan el mismo porcentaje de sombra, como por ejemplo la V y la A₂.

En la Figura 3 se representa la permeabilidad al aire de las mallas de sombreado, en función de sus porcentajes de porosidad.

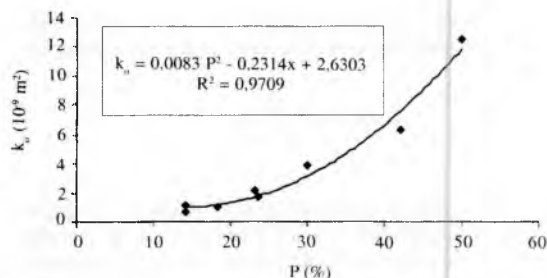


FIGURA 3. Permeabilidad al aire (k_a) de las mallas en función de sus porcentajes de porosidad (P%).

La función de ajuste muestra una alta correlación ($R^2 = 0,97$), observándose que la permeabilidad al flujo de aire para valores de porosidad entre 14 y 50% crece cuadráticamente, entre $0,68 \times 10^{-9}$ y $12,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$.

O sea, comparando entre sí mallas del mismo color (A₁, A₂ o N₁, N₂, N₃, N₄) se observó que un incremento en el porcentaje de sombra causó una disminución en la porosidad (Cuadro N° 2) y en consecuencia una reducción en la permeabilidad al flujo (Figura 3). Al comparar mallas de diferente color, un incremento en el porcentaje de sombreado no implicó necesariamente una disminución en la porosidad y, por ende, tampoco en su permeabilidad al flujo.

Para mallas de rafia coloreadas y no coloreadas, con valores de porosidad comprendidos entre 14 y 50%, la permeabilidad al aire, crece con el aumento en la porosidad y disminuye con mayores porcentajes de sombreado. Una malla negra (no coloreada) comparada con una de color de igual porcentaje de sombreado tiene mayor permeabilidad al aire ya que la primera posee una densidad superficial de masa menor aumentando por lo tanto su porosidad al aire.

En las Figuras 4a y 4b se muestra la distribución de la intensidad de luz transmitida por las mallas N_3 y N_4 , sobre un plano perpendicular al flujo luminoso y para distancias de 15, 30, 50 y 173 cm entre el plano y la malla con un paso de 0,5 cm.

Se observa, en ambos gráficos y a 15 cm de distancia entre la pantalla y la malla, una sucesión de máximos y mínimos de intensidad de luz. Esto deviene en una iluminación discontinua sobre el plano que simula el canopeo. Este efecto se acentuó a medida que disminuyó la porosidad y aumentó el ancho de la hebra.

Se observó que a partir de una distancia entre la pantalla y la malla de 173 cm la influencia de la porosidad sobre la uniformidad de la iluminación se hace despreciable. Este hecho se fundamenta en la característica puntual que adopta el tamaño del agujero con respecto al valor de la distancia entre la malla y la pantalla.

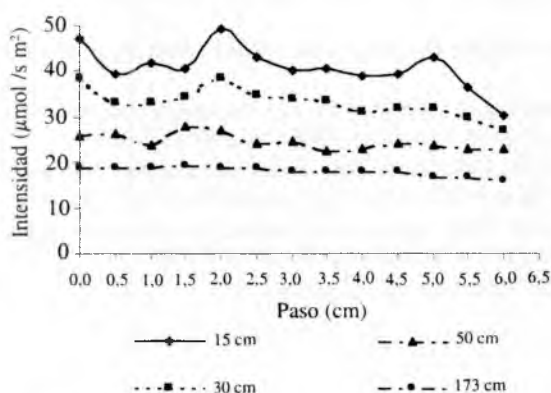


FIGURA 4a. Distribución de la intensidad luminosa transmitida para la malla N_3 de 23% de porosidad y 0,12 cm de ancho de hilo de rafia.

Teniendo en cuenta la distribución de intensidad y los efectos de ventilación para ambas mallas se observó que la N_3 , comparada con la N_4 , concilió mejor la ventilación con la uniformidad de luz sobre el canopeo.

CONCLUSIONES

Si para reducir la temperatura del aire interior de un invernadero se aumenta el porcentaje de sombra, hay que tener en cuenta que esto acarreará una disminución en la porosidad perjudicando la ventilación y produciendo el efecto contrario.

En consecuencia, se puede evaluar la influencia de las mallas de diferente porcentaje de sombreado sobre las variables ambientales dentro de un invernadero calculando sus permeabilidades al aire ya que para mallas de color no hay una relación sencilla entre el porcentaje de sombreado y la permeabilidad al aire de las mismas, debido a la distinta transparencia de los hilos de rafia de color. Este trabajo confirma que el porcentaje de sombreado junto a la permeabilidad al aire de las mallas son factores importantes en la validación del material de cobertura de un invernadero y que estos factores dependen de la porosidad de las mismas y del color.

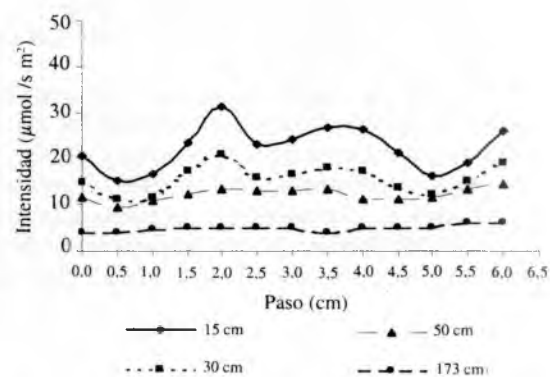


FIGURA 4b. Distribución de la intensidad luminosa transmitida para la malla N_4 de 19% de porosidad y 0,21 cm de ancho de hilo de rafia.

Por otro lado, la distribución de la luz transmitida es uniforme para distancias mayores a 1,73 m entre la malla y el cultivo, e independiente de la porosidad y el ancho de la hebra .

Teniendo en cuenta todos estos factores es posible seleccionar la malla que mejor concilie los procesos de sombreado con la ventilación así como la uniformidad de luz dentro de un invernadero.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING and MATERIALS. D1003. 1977. Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics. *Philadelphia, USA*. 06(01):519-526.
- ANDERSSON, N.E. and O. SKOV. 1991. The influence of Permeability and Shade Factor of the Shading Screen Material on Air and Canopy. *Gartenbauwissenschaft*.56(4):180-184
- BAILEY, B.J. 1995. Greenhouse Climate Control , New Challenges. *Acta Hort*. 399:13– 24
- BOULARD, T.; J.F. MENECEs; M. MERMIER and G. PAPADOKIS. 1995. The Mechanism involved in the natural ventilation of Greenhouses. *Agric. and Fores. Meteor*. 79:61–77.
- BOULARD, T. and A. BAILLE. 1996. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *J. of Agric. Engng. Res*. 65:145–157
- BOULARD, T. and B. DRAOUI. 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *J. of Agric. Engng. Res*. 61: 27–36.
- CASTILLA, N. 1994. Greenhouses in the Mediterranean Area. Technological level and strategic management. *Acta Hort*. 361:44–56
- JAFFRIN, A. and S. MAKHLONF. 1990. Mechanism of light transmission through wet polymer films. *Acta Hort*. 281:11–24.
- KITTA S, C.; T. BOULARD; M. MERMIER and G. PAPADAKIS. 1995. Wind induced air exchange rates in a Greenhouse tunnel with continous side openings. *J. of Agri. Engng. Res*. 65:37– 49
- MIGUEL, A.F.; N.J. Van DE BRAAK and G.P.A. BOT. 1997. Analysis of the airflow characteristics of greenhouses screening materials. *J. of Agri. Engng. Res*. 67:105–112.
- MISTRIOTIS, A.; G.P.A. BOT; P. PICUNO and G. SCARASSCIA MUGNOZZA. 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agri. and Fore. Mete*. 85: 217–228.
- MONTERO CAMACHO J. y MARÍA ASUNCIÓN ANTÓN I VALLEJO. 1993. Tecnología del Invernadero. *Institut Recerca i Tecnologia Agroalimentaria*. 129 pp.
- MONTERO, J.; P. MUÑOZ and A. ANTÓN. 1996. Discharge coefficients of greenhouse windows with insect-proof screens. *Acta Horti*. 443:71–77.
- ORDEN, SUSANA; LIBERTAD MASCARINI; MARTHA GOLDBERG y E. SIERRA. 1997. Luz Transmitida y dispersada por materiales para coberturas de invernaderos. *Rev. de la Fac. de Agro. Univ. de Bs. As.*17(2):177-180.
- ORDEN, SUSANA; F.VILELLA; ANA MARÍA LANDINI y MARTHA GOLDBERG. 2001. Temperatura interior y calidad de luz en invernaderos cubiertos con mallas aluminizadas, negras y coloreadas. *Infor. Tecno.(Chile)*.12(4):171-177
- PAPADAKIS, G.; M. MERMIER; J.F. MENECEs and T. BOULARD. 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *J. of Agri. Engng. Res*. 63:219–228.
- SEARS F. y M. W. ZEMANSKY. 1972. Física. 1ª Ed . *España. Editorial Aguilar*. 1010 pp.