



### PARTE III. UNIDAD 3.

#### CLIMATIZACIÓN ESTIVAL

*En los países mediterráneos, los aspectos relativos al enfriamiento del ambiente en el invernadero son primordiales. La transpiración del cultivo, asociada a la ventilación, es la fuente principal de enfriamiento, pero cuando el cultivo no está suficientemente desarrollado, o cuando ocurren periodos de fuerte radiación solar y elevado déficit saturación del aire, estos procesos no son suficientes para reducir la carga solar incidente. En este caso, es necesario utilizar otros métodos de enfriamiento, que se describen en esta Unidad.*

#### 1- INTRODUCCIÓN

El manejo del clima en período estival es una de las prioridades del sector hortícola de cultivos protegidos en muchas áreas de clima cálido. Durante este período, el más crítico para el cultivo, las plantas soportan situaciones prolongadas de estrés que muchas veces impiden toda posibilidad de cultivo. Cabe resaltar que, bajo invernadero, los objetivos de producción, calidad y rentabilidad tienen que basarse, en parte, en un control racional de los parámetros del medio ambiente (temperatura y humedad del aire; temperatura del suelo/sustrato).

En efecto, en estas áreas, la dificultad que encuentra el sector hortícola en alcanzar una producción de calidad a lo largo del año se debe, en gran parte, a una falta de control del clima y/o a un manejo inadecuado de los equipamientos (ventilación, nebulización, sombreo).

Bajo invernadero, niveles muy bajos de humedad relativa (muchas veces del orden del 30 %), junto con una temperatura elevada del aire (>35 °C), inducen una elevada demanda evaporativa. Si la demanda (es decir, la transpiración potencial) excede la capacidad de absorción de agua por las raíces (limitada a veces, en cultivos fuera de suelo, por el nivel de oxígeno disponible y por una temperatura elevada de sustrato), la planta reacciona con un cierre estomático, es decir, una reducción de la conductancia.

Esto puede inducir una disminución de la transpiración y, por consiguiente, una agravación de las condiciones climáticas bajo invernadero. La limitación de la tasa de transpiración afecta también negativamente a la temperatura de las hojas y se traduce, en la práctica, por una temperatura foliar superior de unos grados a la del aire.

Una buena gestión de los equipos de climatización (ventilación, enfriamiento por evaporación) permite evitar estas situaciones de estrés fisiológico que acarrear consecuencias negativas sobre el comportamiento del cultivo y la producción final (rendimiento y calidad). Sin embargo, en los sistemas comerciales, la gestión de la

humedad se basa en una consigna fija de humedad relativa del aire. Esta consigna se impone de forma generalmente arbitraria, sin tener en cuenta las exigencias fisiológicas de las plantas, que pueden variar además a lo largo del día en función de las condiciones de temperatura y de radiación solar.

## 2- LA VENTILACIÓN

La ventilación es el proceso clave del control climático y juega un papel esencial en la formación del clima bajo invernadero. Hay que tener presente que toda acción sobre el nivel de ventilación modifica a la vez la concentración de CO<sub>2</sub>, la temperatura y la humedad del aire del invernadero. En muchas explotaciones, es el único medio al alcance del agricultor para obtener un cierto control sobre el clima del invernadero bajo situaciones en las que la carga solar es elevada. La estimación de la intensidad de la ventilación se basa en cuantificar las variables siguientes:

a) La tasa de renovación del aire,  $Z$ , que se expresa generalmente en volumen de aire intercambiado por unidad de tiempo ( $\Delta t$ , en segundos o en horas) respecto al volumen del invernadero:

$$Z = \frac{\text{m}^3 / \Delta t}{\text{m}^3_{\text{invernadero}}} \quad (\text{s}^{-1})$$

b) El flujo de aire,  $\phi$ , a través de la ventana, que puede expresarse en:

- Volumen de aire intercambiado por unidad de tiempo ( $\phi$  en  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ).
- Volumen de aire intercambiado por unidad de tiempo respecto a la superficie del invernadero ( $\phi$  en  $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

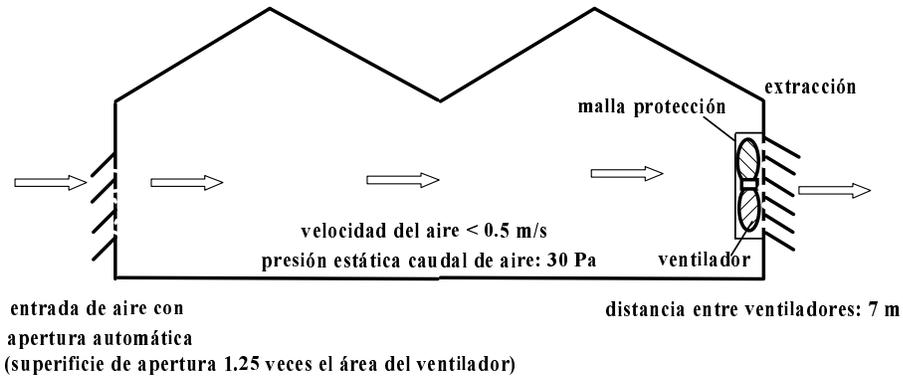
Un sistema de **ventilación eficiente** debe de cumplir los criterios siguientes:

- 1- Inducir la mezcla del aire interior y exterior.
- 2- Generar un nivel adecuado de velocidad del aire con el fin de promover el intercambio de energía y de masa entre las plantas y el aire interior.

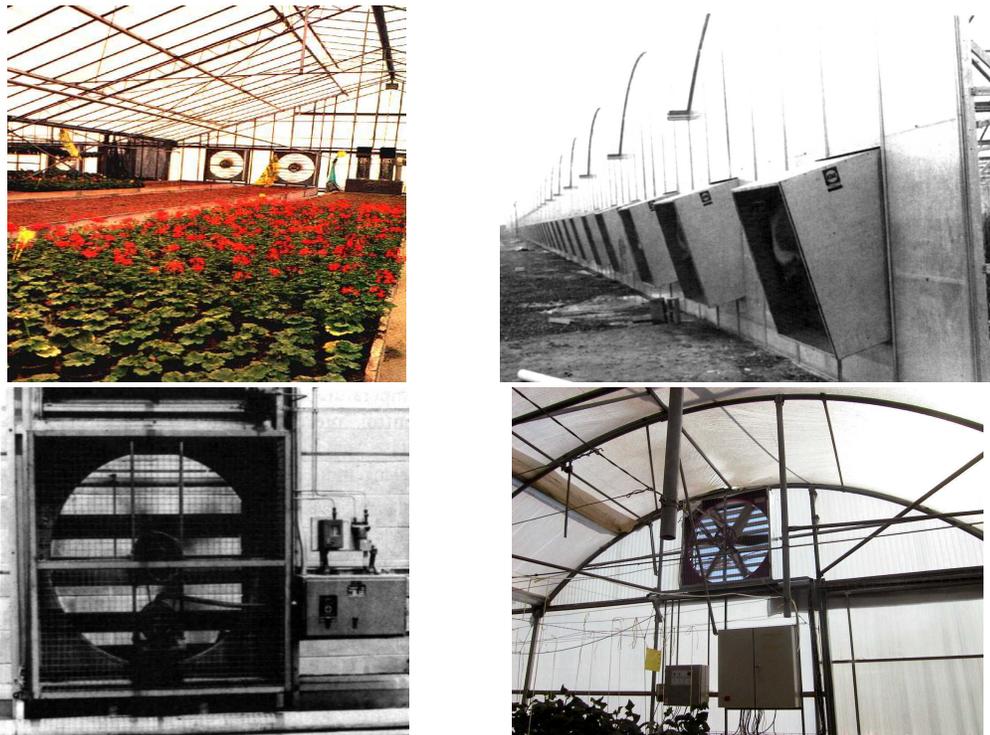
El movimiento del aire bajo invernadero se puede generar por medio de ventiladores (ventilación forzada, mecánica o dinámica), o bien utilizando la ventilación natural, proceso que depende de la acción que ejercen sobre el flujo de aire a través de las ventanas el viento y la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior.

### 2.1- LA VENTILACIÓN FORZADA

La ventilación forzada se genera con extractores o ventiladores que fuerzan el movimiento de aire a través de una apertura ubicada en el extremo opuesto (Figura 1).



**Figura 1.** Esquema de un invernadero con un sistema por ventilación forzada.



**Figura 2.** Extractores de ventilación forzada instalados en invernaderos.

**2.2- LA VENTILACIÓN NATURAL**

La ventilación se denominada “natural” cuando solamente actúan, sobre el intercambio del aire interior con el aire exterior, las fuerzas exteriores naturales. El flujo de aire a través de una ventana tiene como fuerza motriz la diferencia de presión que se establece entre ambos lados de la ventana.

$$\Delta P = P_i - P_o$$



Esta diferencia de presión tiene su origen en dos procesos diferentes:

- La **influencia del viento**, que genera una distribución de la presión sobre la superficie del invernadero.
- La influencia de la **diferencia de temperatura** entre el interior y el exterior, que genera una diferencia de densidad y, por consiguiente, de presión.

### 2.2.1- Las bases de la ventilación natural

La base de los cálculos de la tasa de renovación del aire se basa en la relación que liga la diferencia de presión que se establece entre ambos lados de la ventana con la velocidad del aire a través de la misma (ver Figura 3):

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho u^2 F \quad \text{o bien} \quad u = B \sqrt{\frac{2}{\rho} |\Delta p|}$$

donde:

F = coeficiente de fricción, que representa la resistencia que ofrece la ventana al flujo de aire.

u = velocidad del aire a través de la ventana.

$\Delta p$  = diferencia de presión entre ambos lados de la ventana.

$\rho$  = densidad del aire.

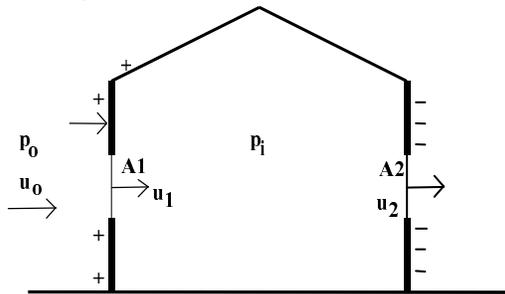
B = coeficiente de descarga que depende de la geometría de la ventana y de su ubicación en el invernadero ( $B = F^{-0.5}$ ) (ver Figura 4).

El flujo volumétrico de aire ( $\Phi_v$  en  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) a través de una ventana de superficie A (= L H), se puede determinar cuando se conoce la diferencia de presión  $\Delta p$ :

$$\Phi_v = A u = A B \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

siendo la tasa de renovación del aire para un invernadero de volumen V:

$$Z = \Phi_v / V$$

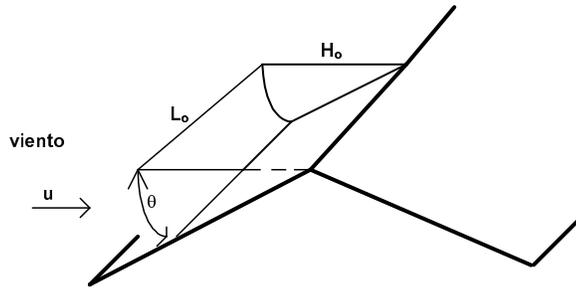


**Figura 3.** Flujo de aire a través de las ventanas. P= presión, u = velocidad del aire, A = superficie de la ventana.

La diferencia de presión  $\Delta p$  se evalúa teniendo en cuenta que resulta de la combinación de dos efectos:

- El efecto del viento (es decir su velocidad y dirección) que puede actuar como una presión o como una depresión (succión).
- El efecto de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la ventana.

El efecto del viento y el efecto de la diferencia de temperatura tienen lugar de forma simultánea. En general, para velocidades de viento superiores a  $1.5 \text{ m s}^{-1}$ , el efecto térmico es despreciable.



**Figura 4.** Representación esquemática de una ventana cenital. El coeficiente de descarga B depende de L, de H y del ángulo de apertura,  $\theta$ .

**a) Influencia del viento**

Cuando el aire sopla sobre un invernadero de geometría determinada, se genera un campo de presiones en diferentes puntos de su superficie exterior que depende (i) de la velocidad media del viento y (ii) de su nivel de turbulencia. Esto explica que, cuando se estudia el efecto del viento, hay que tener en cuenta:

- Una componente estacionaria, que depende de la velocidad del viento.
- Una componente fluctuante, que depende de la turbulencia.

**- La componente estacionaria**

En este caso, la diferencia de presión  $\Delta p$  entre ambos lados de la ventana se considera proporcional a la energía cinética del viento, medida al exterior a una altura de referencia:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho u_0^2 C_v$$

donde  $u_0$  es la velocidad del viento medida a la altura de referencia, en la zona no perturbada por la presencia del invernadero, y  $C_v$  es el coeficiente de presión del viento, definido por:

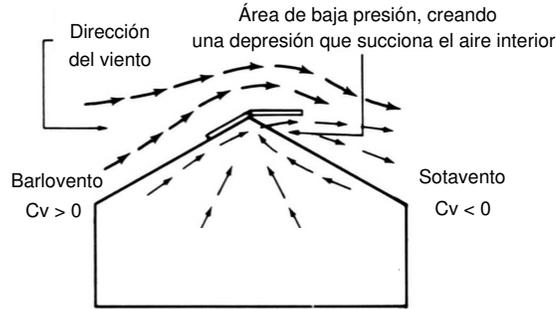
$$C_v = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho u_0^2}$$

Si consideremos un invernadero con una ventana orientada a barlovento y otra orientada a sotavento, tendremos que tener en cuenta dos coeficientes de presión del viento (Figura 5):

- Un coeficiente de presión positivo,  $C_{v,e}$  para la ventana orientada a “barlovento” ya que, en este caso,  $\Delta p > 0$ ,
- Un coeficiente negativo,  $C_{v,s}$ , para la ventana orientada a “sotavento” ya que, en este caso,  $\Delta p < 0$ .

El flujo de aire se desplaza desde la ventana orientada a “barlovento” hacia la ventana orientada a “sotavento” (Figura 5). La diferencia de presión entre la entrada y la salida será:

$$p_e - p_s = (C_{v,e} - C_{v,s}) \frac{1}{2} \rho u_0^2$$

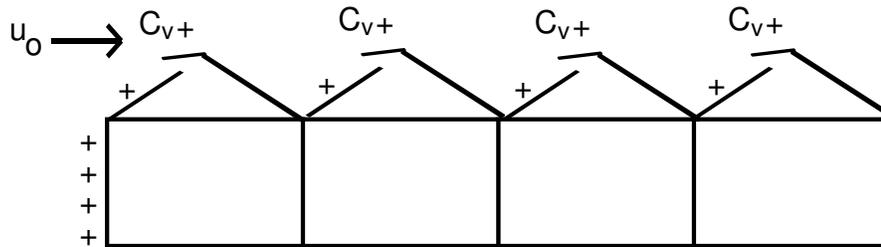


**Figura 5.** Representación esquemática de una ventana cenital.

Cuando el invernadero tiene varias ventanas localizadas en posiciones diferentes, y con diferentes valores del coeficiente de presión, la diferencia de presión estática media entre el interior y el exterior del invernadero, origina un flujo de aire desde las zonas con  $C$  positivo hacia las zonas con  $C$  negativo. Es éste el intercambio que tiene lugar en invernaderos con aperturas laterales y cenitales. Los valores del coeficiente  $C$  se pueden encontrar en la bibliografía para diferentes ángulos de ataque del viento.

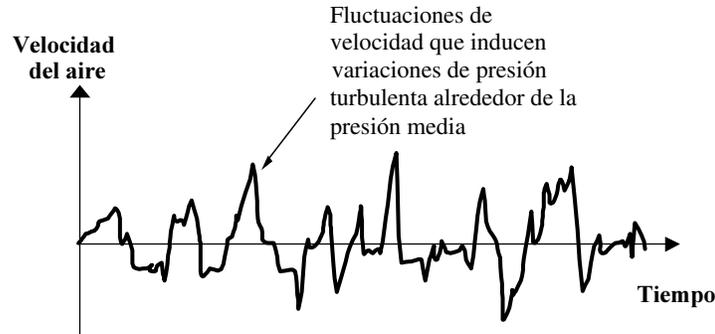
#### - La componente fluctuante

En un invernadero en el que todas las ventanas están situadas del mismo lado (caso frecuente de los multitúneles de plástico que se encuentran en sur de Europa), llegaríamos a la conclusión de que la tasa de ventilación es cero ya que todas las ventanas tienen el mismo coeficiente de presión (Figura 6).



**Figura 6.** Esquema del reparto de coeficientes de presión en un invernadero en el que todas las ventanas están situadas del mismo lado.

En este caso, la naturaleza fluctuante del viento da lugar a una variación temporal de presión que pasa de ser positiva a negativa (Figura 7). La amplitud de esta variación temporal es la causa motriz de la renovación del aire del invernadero, generando un efecto "pistón" que, a intervalos, hace entrar y salir el aire por la misma ventana (Figura 7). La diferencia de presión se evalúa de forma similar al caso anterior (componente estacionaria), sustituyendo el coeficiente de presión por un coeficiente de fluctuación de presión.



**Figura 7.** Representación esquemática del efecto fluctuante del viento.

**b) El efecto térmico (o “chimenea”)**

En este caso, la fuerza motriz de la ventilación es la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior. Esta diferencia induce diferencias de densidad y, por consiguiente, de presión. Si consideramos una apertura vertical única, la diferencia de densidad entre el aire caliente interior y el aire frío exterior genera una diferencia de presión hidrostática que varía a través de la altura de la ventana. La Figura 8 muestra un esquema de la distribución de la presión a través de la altura de una ventana vertical.

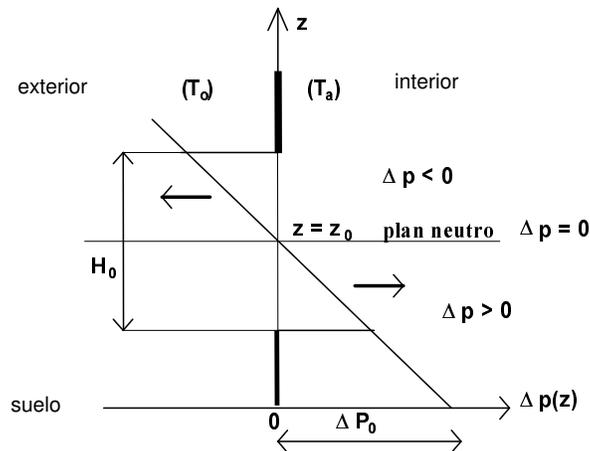
Dado que el flujo que entra tiene que ser igual al flujo que sale, esto conduce a definir el concepto de plan neutro en el que la presión interior es igual a la exterior:

- Por debajo del plan neutro la presión exterior es superior a la interior ( $\Delta p$  positivo y el aire penetra en el invernadero).
- Por encima del plan neutro la presión exterior es inferior a la interior ( $\Delta p$  negativo y el aire sale del invernadero).

Se puede demostrar (Boulard y Baille, 1995) que la fuerza motriz del flujo es proporcional a la diferencia de temperatura  $\Delta T$  entre el interior,  $T_a$ , y el exterior,  $T_o$  (Figura 8).

$$\Delta p = \Delta p_o - \rho g z (\Delta T / T_o)$$

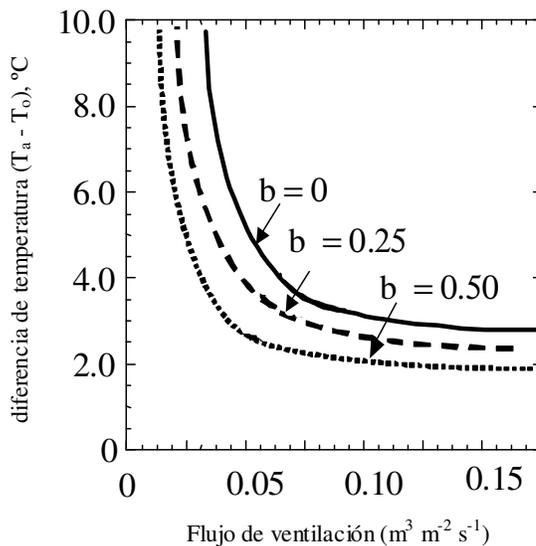
siendo  $g$  la aceleración de la gravedad.



**Figura 8.** Esquema del campo de presiones generadas por el efecto térmico.

### 2.3- INFLUENCIA DE LA VENTILACIÓN SOBRE EL CLIMA INTERIOR

La influencia de la tasa de ventilación sobre el clima interior puede evaluarse a partir de los balances de energía y de masa del invernadero. A partir del balance de energía sensible del volumen de aire, se puede estimar el flujo de ventilación que se necesita para alcanzar un determinado valor de  $\Delta T$  (Figura 9). La diferencia de temperatura depende también de la fracción de la carga solar que se transforma en calor latente ( $b$ ). Cuanto más baja sea la fracción de la energía solar que se utiliza en el proceso de transpiración (p.e., cuando  $b$  es muy bajo), más elevado será el nivel de ventilación que se necesita para mantener una diferencia de temperatura determinada.



**Figura 9.** Aumento de la temperatura del aire interior,  $T_a$ , respecto al aire exterior,  $T_o$  en función del flujo de ventilación para diferentes niveles de  $b$  (= fracción de la radiación que se transforma en calor latente a través de la transpiración). Se puede observar que, para mantener una diferencia  $T_a - T_o$ , por ejemplo de  $4^{\circ}C$ , las exigencias de ventilación aumentan cuando disminuye la transpiración (es decir cuando disminuye  $b$ ). Adaptado de Day y Bailey, 1999.

También se puede estimar el efecto de la ventilación sobre la humedad del aire interior, utilizando el balance de vapor de agua del volumen de aire (Ver Unidades 6 y 8). Se necesita una estimación de la transpiración del cultivo, que se puede considerar como una fracción  $b$  de la radiación solar, o bien utilizando un modelo de transpiración. Hay que resaltar que la transpiración depende de la humedad del aire, lo que implica un mecanismo de retroacción entre transpiración y humedad, que hay que tener en cuenta en los algoritmos y sistemas de control de la ventilación.

La ventilación tiene también una importancia relevante en el nivel de concentración de  $CO_2$  del aire del invernadero. Esto se debe a que puede actuar (ver Unidades 4 y 8):

- Como una fuente de  $CO_2$  a partir del aire exterior que atraviesa la ventilación.
- Como un sumidero de  $CO_2$  cuando el enriquecimiento carbónico se aplica en un invernadero cerrado (pérdidas de  $CO_2$  a través de los defectos de estanqueidad).

En regla general, una ventilación eficiente exige que se diseñe el invernadero con una superficie total de apertura de las ventanas de 0.20-0.25 veces la superficie del suelo.

### 3- SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO POR EVAPORACIÓN

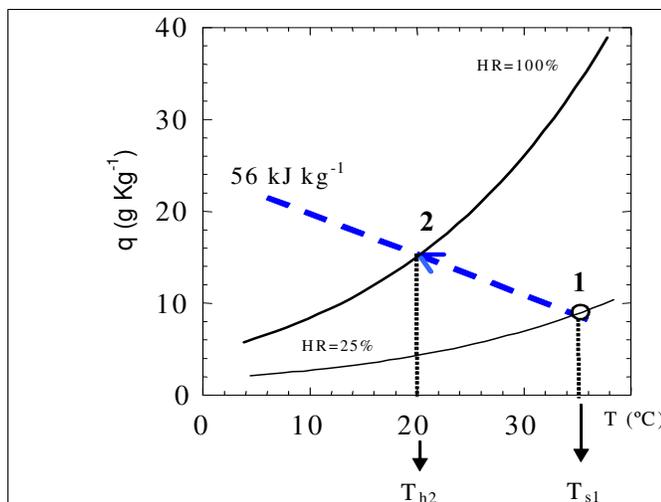
Entre los sistemas que se utilizan hoy día para controlar el clima en período estival cabe destacar las *paneles de evaporación* y la *nebulización*. En todos los sistemas que controlan la humedad del aire, hay que tener en cuenta los aspectos siguientes:

- Cuando la temperatura de la planta desciende por debajo de la temperatura del punto de rocío del aire, el agua se condensa en las hojas.
- Un elevado nivel de humedad favorece el desarrollo de enfermedades (por ejemplo, *botrytis* en el rosal).
- El desarrollo de muchas enfermedades depende, no solamente del nivel de humedad, sino también de la duración de humectación de las hojas.
- Condiciones de elevada humedad del aire, o de humedad muy baja, limitan el proceso de transpiración.

#### 3.1 - MODO DE ACCIÓN

El paso del agua del estado líquido al estado vapor es un proceso que consume energía: se necesitan aproximadamente 2.5 MJ para evaporar 1 kg de agua (Unidad 2). Los sistemas de climatización que utilizan paneles de evaporación o boquillas de nebulización se basan en este proceso, que conlleva la absorción de energía del aire y, por consiguiente, la disminución de su temperatura.

En el proceso de evaporación, el nivel mínimo que puede alcanzar la temperatura del aire corresponde a su temperatura húmeda,  $T_h$ . Si consideramos una masa de aire húmedo con una determinada temperatura seca y humedad relativa, el valor de  $T_h$  representa la temperatura que tendría el aire si estuviese saturado (100 % de humedad relativa) sin que varíe su contenido energético (Figura 10).



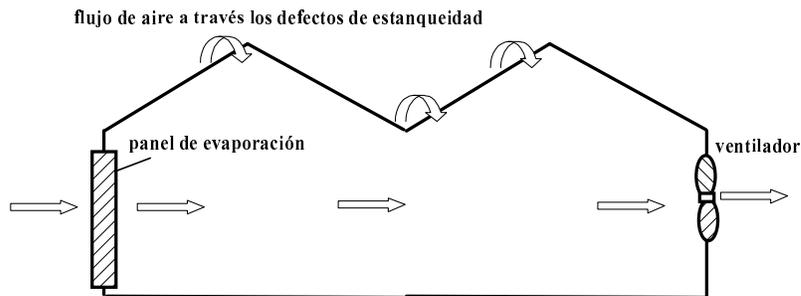
**Figura 10.** Ejemplo de evolución de la humedad absoluta ( $X$ ,  $\text{g}_{\text{vapor agua}} \text{kg}_{\text{aire}}^{-1}$ ) en función de la temperatura para diferentes clases de humedad relativa del aire (HR. %) y una entalpía del aire de  $56 \text{ KJ kg}^{-1}$ . El estado inicial del aire corresponde al punto (1). En el proceso de evaporación,  $T_{h2}$  representa la temperatura más baja que puede alcanzar el aire cuya temperatura y humedad absoluta se dan en el punto (1).

Puede observarse en la Figura 10 que, en el curso del proceso, el contenido energético (entalpía) de la mezcla aire/vapor permanece constante. Los paneles de evaporación (o “cooling-pad”) y la nebulización están basados en este principio: la evaporación del agua utiliza la energía sensible contenida en el aire.

### 3.2- LOS PANELES DE EVAPORACIÓN O “COOLING-PAD”

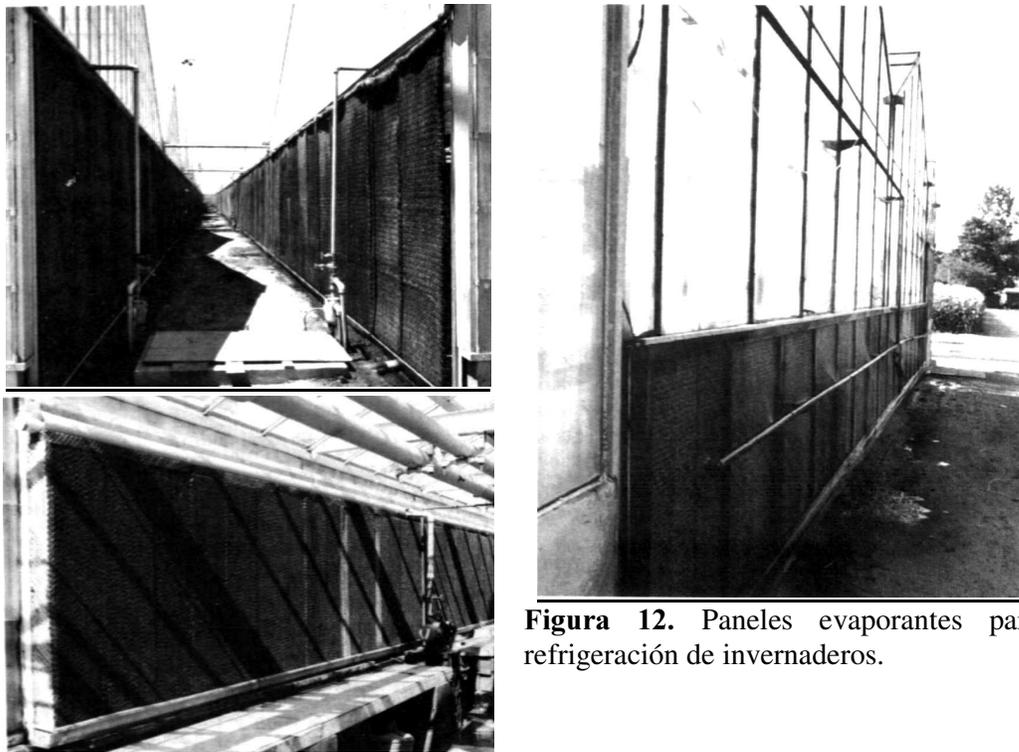
En la práctica, se utilizan dos sistemas de **paneles de evaporación**: (“evaporation pad” o “cooling system” en inglés):

(i) El sistema que actúa por **succión (presión negativa)** consiste en disponer los paneles de evaporación en la pared opuesta a del extractor (Figura 11). El aire exterior pasa a través del panel, se evapora al atravesar el invernadero, y es extraído por los ventiladores localizados en el lado opuesto. La presión en el interior del invernadero es, en este caso, inferior a la exterior, por lo que el aire exterior y el polvo pueden penetrar en el invernadero a través de los defectos de estanqueidad.



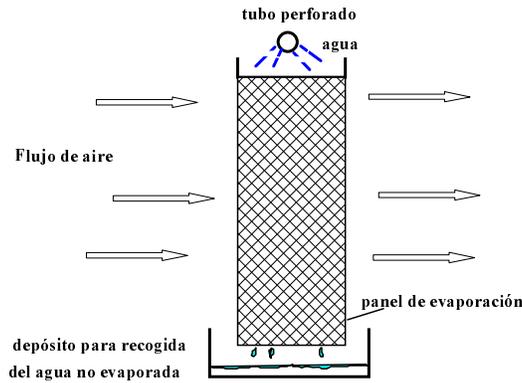
**Figura 11.** Sistema panel-ventilador con acción por succión (presión negativa).

Los paneles se suelen disponer de forma vertical u horizontal (Figura 12). En el ejemplo de la Figura 13 se muestra un ejemplo de panel vertical, en la que la humidificación se hace por medio de un tubo perforado.

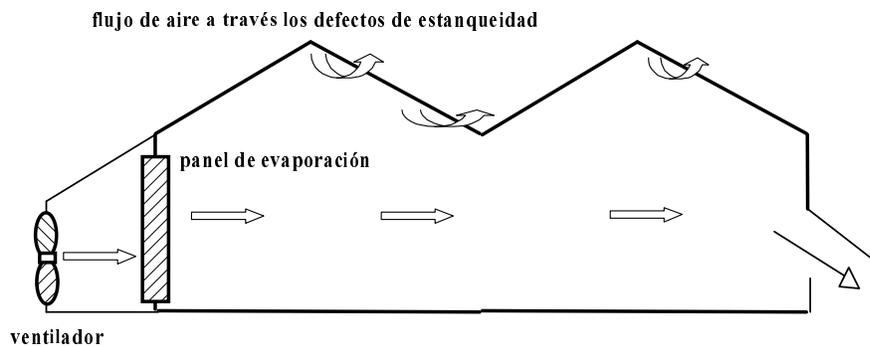


**Figura 12.** Paneles evaporantes para refrigeración de invernaderos.

(ii) El sistema que actúa bajo presión (presión positiva). En este caso los paneles de evaporación y la ventilación se disponen de forma contigua (Figura 14). Los ventiladores se colocan antes del panel de evaporación, generándose en el interior del invernadero una presión superior a la del exterior, por lo que el aire exterior, cargado de partículas de polvo, no puede penetrar en el invernadero.



**Figura 13.** Representación esquemática de un panel de evaporación.



**Figura 14.** Sistema panel-ventilador con acción por presión.

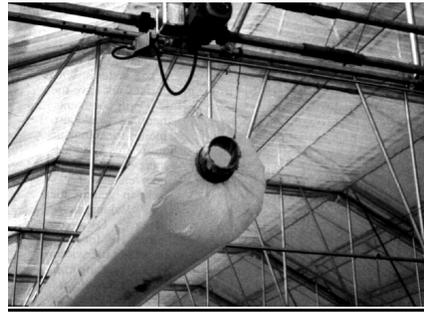
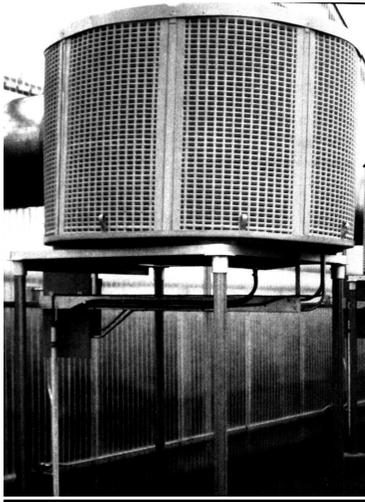
Existen otras configuraciones que consisten en disponer los paneles evaporantes en un compartimiento al exterior del invernadero. En este caso, el aire frío es pulsado a presión al interior del invernadero a través de tubos de distribución (Figura 15).

Como puede observarse en la Figura 10, el efecto de refrigeración depende de la diferencia entre la humedad relativa del aire exterior, que debe pasar a través del panel, y la humedad del panel (en teoría se mantiene a un 100 %). Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será la eficiencia del sistema, es decir mayor será el salto térmico  $T_{s1}-T_{h2}$ . Esto explica que el “cooling-system” sea más eficiente en zonas con clima seco.

Las características y exigencias generales de este sistema de climatización pueden resumirse como sigue:

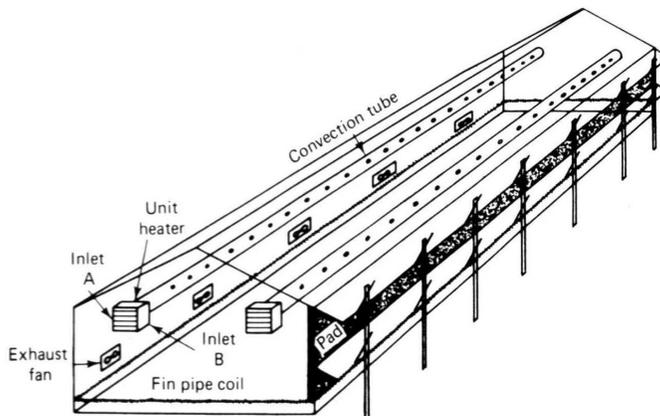
- Los paneles están formados ya sea por virutas de madera o bien por materiales celulósicos que se presentan en forma de láminas impregnadas con aditivos. Actualmente, se utilizan materiales celulósicos que no necesitan un soporte de tela metálica que puede oxidarse con el tiempo.

- El espesor de un panel varía entre 100 y 200 mm, y la superficie total del panel debe de alcanzar, aproximadamente, un  $1 \text{ m}^2$  por cada  $20\text{-}30 \text{ m}^2$  de invernadero.



**Figura 15.** Sistema de “cooling-pad” actuando por presión. La humidificación se hace en un compartimiento situado al exterior del invernadero (izquierda). El aire frío y húmedo es distribuido al interior a través de conductos de plástico (derecha).

- La distancia máxima entre el panel y el ventilador no debe exceder unos 30-40 m, con el fin de evitar fuertes gradientes de temperatura. Esto exige que los paneles se ubiquen en el sentido longitudinal en invernaderos de gran longitud (Figura 16).
- La distancia máxima entre ventiladores no debe exceder 10 m.
- La velocidad del aire suele estar comprendida entre  $0,5$  y  $1,75 \text{ m s}^{-1}$ .
- La tasa de renovación del aire que proporciona el sistema de extracción suele estar comprendida entre  $120$  y  $150 \text{ m}^3$  a la hora por metro cuadrado de invernadero.
- El caudal mínimo de agua, para paneles de 100 mm de espesor, es de unos 10 litros por minuto y por metro lineal de panel.
- Para que el sistema alcance un buen rendimiento, el invernadero se mantiene con la ventilación natural cerrada.
- Los paneles se pueden utilizar en áreas de cultivo que tengan agua de baja calidad.



**Figura 16.** En los invernaderos de gran longitud, es aconsejable disponer los paneles en el sentido longitudinal. El flujo de aire húmedo tendrá un recorrido lateral más corto, lo que permite una mayor eficiencia del sistema.

### 3.3- LA NEBULIZACIÓN (O “FOG-SYSTEM”)

Existen dos tipos de sistemas de enfriamiento por emisión de gotas de agua en el interior del invernadero (la nebulización y la aspersión). La diferencia entre la aspersión y la nebulización estriba en el tamaño de las gotas. En el caso de la nebulización, el tamaño de las gotas (entre 5-10  $\mu\text{m}$ ) es inferior al que se obtiene con la aspersión. La nebulización se basa en un proceso de fragmentación del agua que, al dispersarse en el aire en forma de niebla (Figura 17), se evapora provocando su enfriamiento. Debido al pequeño tamaño de las gotas, su velocidad de caída es pequeña, por lo que se evaporan en el aire sin depositarse en las hojas. En el caso de la aspersión, se utilizan emisores de tipo micro-aspersores o micro-difusores que tienen una distribución de tamaño de gotas por encima de 100  $\mu\text{m}$ , generando el depósito de gotas sobre las superficies y una menor eficiencia de evaporación.

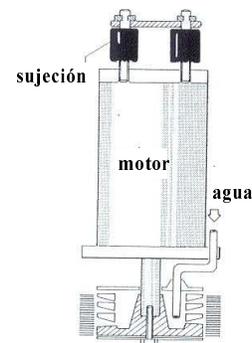


**Figura 17.** Sistemas de nebulización (o “fog” systems) con rampas provistas de boquillas de pulverización del agua a alta presión.

La nebulización exige, al contrario que los paneles de vaporización, que las ventanas estén ligeramente abiertas y que se disponga de un sistema automatizado que permita controlar a la vez la temperatura y la humedad relativa del aire. En la práctica, se utilizan tres tipos de emisores:

#### - Humidificadores

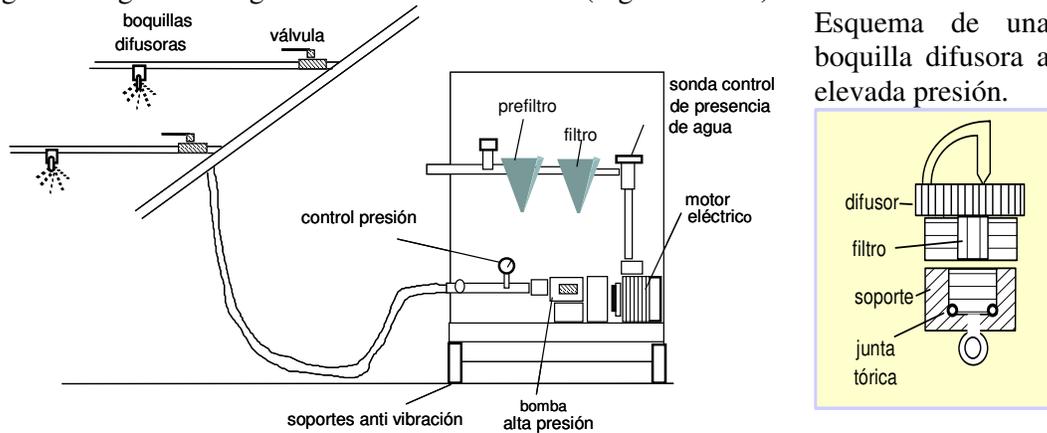
Existen varios tipos de humidificadores o aspersores. La Figura 18 da un ejemplo en el que se utilizan boquillas dotadas de un motor que gira a elevada velocidad, provocando la dispersión de las gotas de agua en el aire. Es el sistema más económico y tiene la ventaja de que se puede utilizar con agua de baja calidad. La densidad que suele utilizarse para este tipo de boquillas es de, aproximadamente, 1 boquilla cada 30-50  $\text{m}^2$  de invernadero.



**Figura 18.** Esquema de una boquilla de humidificación. Von Zabeltitz, 1999.

### - Boquillas de alta presión

En la Figura 19 se da un esquema de las componentes de un sistema de nebulización a elevada presión. Este sistema utiliza agua a una presión comprendida entre 4 y 7 MPa (1 MPa $\approx$ 10 bares). El agua, previamente filtrada, llega a alta presión al dispositivo de tuberías donde están ubicadas las boquillas. Al entrar en las boquillas, el agua atraviesa un orificio microscópico antes de alcanzar una aguja de difusión donde el chorro de agua se fragmenta en gotas de tamaño minúsculo (Figuras 19-20).



**Figura 19.** Detalles de un sistema comercial de nebulización con boquillas difusoras de alta presión

El caudal máximo aproximado por boquilla es de unos 7 litros por hora. Este sistema es relativamente oneroso y, por ahora, su utilización queda limitada a cultivos que aporten un elevado valor añadido, como las plantas ornamentales (Figura 20).



**Figura 20.** Nebulización de plantas ornamentales con boquillas de alta presión.

Las exigencias que conlleva el sistema pueden resumirse como sigue:

- Un tratamiento del agua cuando ésta posea niveles elevados de calcio y de magnesio que bloquean las boquillas. Cuando se parte de agua de buena calidad, su tratamiento se limita a un filtrado y a una inyección de ácido cítrico para mantener el pH alrededor de 6.6.

- Un conjunto formado por bomba(s), motor(es) y tuberías que soportan una elevada presión.

- Una evaluación correcta del caudal total de agua que aportan las boquillas por metro cuadrado de invernadero. En general, el caudal total suele ser dos veces superior a la transpiración máxima del cultivo (por ejemplo, en rosas se puede adoptar un caudal de unos 0.8 litros a la hora por metro cuadrado de suelo).

**- Boquillas de baja presión**

En este caso, se utiliza agua y aire a presión para fragmentar el agua en una cámara de mezcla con una boquilla (ver Figura 21). Los niveles de presión que se utilizan (< 10 bares), para el agua y para el aire, son inferiores a los de un sistema a alta presión. Al igual que en el caso anterior, el caudal total de las boquillas debe de evaluarse correctamente (ver aplicaciones en Excel parte IV, diseño de un sistema de nebulización).

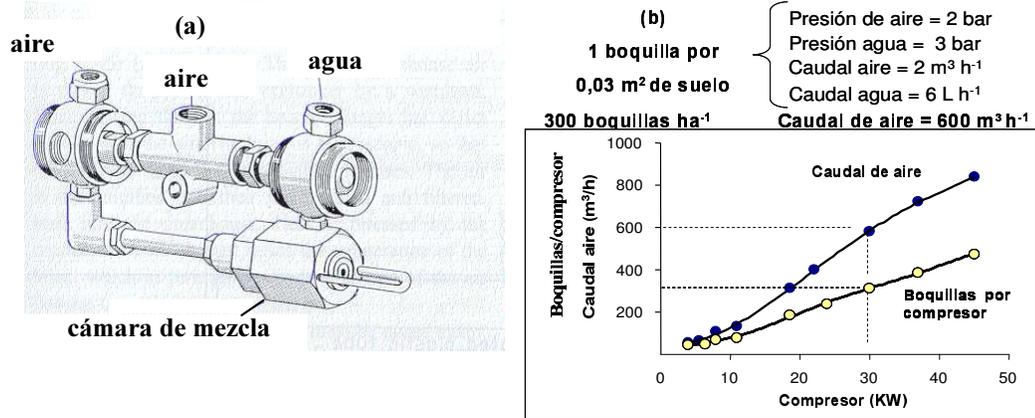


Figura 21. (a) Esquema de una boquilla a baja presión. Sistema de evaporación con aire-agua a presión. Von Zabeltitz, 1999. (b) Características de las boquillas. Ejemplo de número de boquillas necesarias y del caudal de aire en función de la potencia del compresor.

**4- ASPERSIÓN O CIRCULACIÓN DE AGUA EN LA CUBIERTA DEL INVERNADERO**

**- Aspersión en el techo**

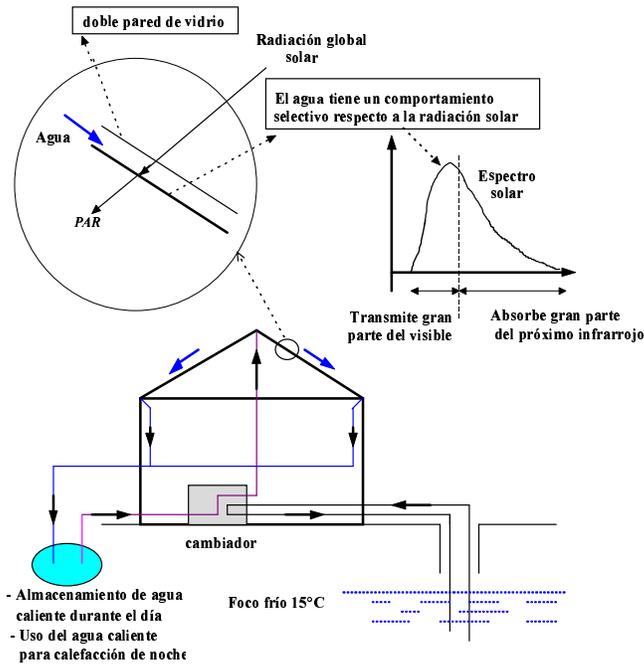
La aspersión de agua por medio de un equipo de riego (aspersores) instalado en la cumbre puede también reducir la temperatura interior. Los ensayos llevados a cabo con este sistema en diferentes países no han dado resultados muy convincentes, debido a que induce una reducción de la temperatura interior del orden de 1 °C. La aspersión de agua dentro del invernadero, en el suelo, es más eficiente.

**- Circulación de agua en el techo (doble pared)**

El agua tiene un comportamiento selectivo respecto a la radiación global solar, es decir, presenta una pequeña absorción de la radiación visible y absorbe gran parte del próximo infrarrojo solar (a partir de, aproximadamente, 1 micra). Por lo tanto, cuando se hace circular agua al interior de una doble pared, la radiación solar provoca, al atravesar la pared, el calentamiento del agua que, al absorber la radiación, reduce la carga solar que llega al interior del invernadero, sobre todo en la gama de longitud de onda no utilizada en el proceso fotosintético. La reducción en el visible es mucho menor pero no es despreciable (del orden del 10-12 %). Los sistemas que utilizan la circulación de agua al interior de una doble pared de cubierta (Figura 22) tienen una doble función:

a) Refrigeración durante el verano, utilizando el agua de un foco frío.

(b) Calefacción durante el invierno. Durante el día, el agua que circula en la pared se calienta al absorber la radiación solar y se almacena en depósitos enterrados en el suelo y dotados de un buen aislamiento de paredes. De noche, el agua caliente almacenada se utiliza para la calefacción, haciéndola circular al interior de tubos de calefacción de plástico o bien metálicos.



**Figura 22.** Invernadero solar INRA-CEA, con circulación de agua en el techo.

Con este sistema se consigue un ahorro en calefacción que puede alcanzar un 75 % y una climatización estival muy eficiente. Sin embargo, es un sistema complejo y tiene un coste elevado, exigiendo un periodo de amortización superior a 15 años. Otro inconveniente es que induce una reducción de la radiación visible al interior del invernadero que, como ya se ha indicado, no es despreciable.

## 5- SOMBREO

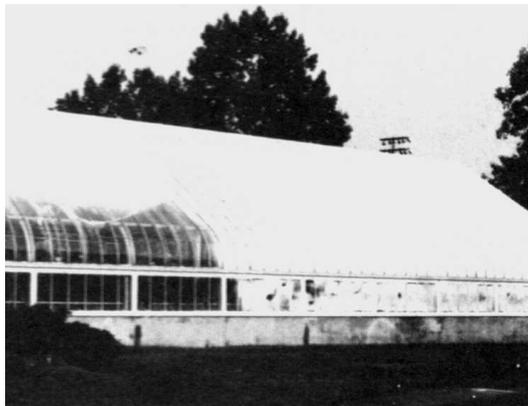
La experiencia muestra que el sombreado debe ser una solución que hay que adoptar, como ultimo recurso, cuando la ventilación y los sistemas de enfriamiento por evaporación no son suficientes para mantener condiciones climáticas convenientes en el invernadero. El inconveniente principal del sombreado es la reducción, a veces muy importante, de la radiación solar incidente sobre las plantas. Además, cuando se utilizan pantallas interiores, la tasa de ventilación disminuye de forma drástica, lo que redundaría en un aumento de la temperatura del aire interior.

Se pueden distinguir dos métodos principales de sombreado:

- El blanqueo de las paredes con productos tipo “blanco de España”.
- Las pantallas de sombreado, situadas al interior o en el exterior del invernadero.

### 5.1- BLANQUEO DE PAREDES

Es, sin duda, el método más común y económico en el que se utilizan, para pintar la cubierta, productos a base de carbonato cálcico y un agente humectador. (Figura 23). Las normas de aplicación del producto de blanqueo son totalmente empíricas y, por tanto, el porcentaje de reducción de la radiación depende de la concentración de la mezcla y de la cantidad aplicada. De manera aproximada, se puede considerar que si se mezcla 1 kg de producto con 4 litros de agua, la reducción de la transmisión será del orden de un 50% (FAO, 2002). Existen productos comerciales más sofisticados, que tienen la propiedad de ser más transparentes cuando se humectan (por ejemplo, cuando llueve o que el aire está a saturación de humedad). En todo caso, hay que tener presente que, por ahora, todos los productos que se utilizan para el blanqueo presentan una reducción de la radiación ligeramente superior en la gama del visible que en la gama del próximo infrarrojo solar.



**Figura 23.** Blanqueo de las paredes de un invernadero

El blanqueo es, generalmente, un sistema más eficiente de reducción de la temperatura que las pantallas de sombreo ubicadas al interior del invernadero. Ensayos realizados en Argentina en túneles de plástico muestran que se pueden alcanzar, respecto a un invernadero sin blanqueo, un descenso de la temperatura del aire de 2 a 3 °C, y una disminución de la temperatura de las plantas (tomates) de unos de 5°C. En Almería, se midieron descensos del mismo orden (2 a 3 °C) de temperatura de aire con el empleo de cal, en estructuras de tipo parral de 22 m de anchura y ventilación lateral.

### 5.2- PANTALLAS DE SOMBREO

La utilización de pantalla de sombreo exige, como en el caso del blanqueo y con el objeto de no reducir de forma drástica la radiación solar al interior del invernadero, que se tengan en cuenta las exigencias de la especie cultivada, es decir, el nivel de saturación lumínica que presenta la tasa fotosintética. En la práctica, se utilizan pantallas que presentan porcentajes de transmisión para la radiación solar entre el 35% y 50 %.

Actualmente, se ha generalizado el uso de pantallas aluminizadas, ya sea por las dos caras o solamente por la cara exterior. La ventaja que presenta este tipo de pantallas es que reflejan la radiación solar en lugar de absorberla, lo que provocaría un aumento de la temperatura de la pantalla y, por consiguiente, de la temperatura del aire del invernadero.

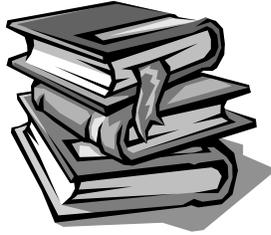
Sin embargo, no es aconsejable el uso de pantallas de color. Este aspecto puede explicarse debido a que el color de un cuerpo depende de la radiación que refleja en la gama del visible. Por ejemplo un filme de color naranja refleja la radiación naranja y absorbe el color complementario (la radiación azul). Así pues, una pantalla de color va a presentar una reducción importante de la radiación visible. Además, la reducción se efectúa por absorción del color complementario, lo que contribuye al calentamiento de la pantalla y, como ya se ha indicado, al calentamiento del aire del invernadero.

En algunos casos, principalmente en cultivos ornamentales de gran valor, los agricultores utilizan pantallas móviles que se extienden y repliegan dentro del invernadero (Figura 24).



**Figura 24.** Ejemplos de pantallas de sombreo en el interior de invernaderos

El principal inconveniente de las pantallas interiores es la reducción de la ventilación natural, sobre todo si ésta es de tipo cenital (en cumbre), lo que quita mucho interés al uso de esta técnica para reducir la temperatura del aire. Trabajos realizados en Francia (González-Real y col., 1988), demostraron que la disminución de la temperatura del aire fue mínima y que, para ciertos materiales poco permeables al aire, la pantalla inducía un nivel de estrés superior que cuando no se utilizaba. No se recomienda esta técnica, excepto para especies que exijan niveles relativamente bajos de radiación solar y que no tengan grandes exigencias de ventilación.



## Referencias bibliográficas

### Parte III. LA CLIMATIZACIÓN

#### [1] *Climatización: Sistemas de Calefacción*

**BAILLE A., 1989.** Greenhouse microclimate and its management in mild winter climates. *Acta Horticulturae*, 246: 23-36.

**BAILLE A., VON ELSNER B., 1989.** Low temperature heating systems in greenhouse production. Technological aspects and thermal performances. In *"Utilization of solar and Geothermal Energy for Heating Greenhouses."* CNRE Bulletin, n° 21, FAO, Chapter 6, 107-116.

**BAILEY B.J., SEGNER I., 1989.** Optimum control of greenhouse heating. *Acta Horticulturae*, 245, 512-518.

**CHALABI, Z.S., BAILEY B.J., WILKINSON D.J., 1996.** A real-time optimal control algorithm for greenhouse heating. *Computers and Electronics in Agriculture*, 15, 1-13.

**GONZALEZ-REAL M.M., BAILLE A., 1998.** Calefacción de invernaderos. In: *Tecnología de Invernaderos II*. Pérez Parra J., Cuadrado Gómez M(Eds.), F.I.A.P.A. Almería, 339-397.

#### [2] *Climatización: Enriquecimiento en CO<sub>2</sub>*

**BELLAMY L.A., KIMBALL B.A., 1986.** CO<sub>2</sub> enrichment duration and heating credit as determined by climate. In: *Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops*. Enoch H.Z., Kimball B.A. (Eds.), Vol II. CRS Press, Boca Raton Florida.

**CHALABI Z.S., 1992.** A generalized optimization strategy for dynamic CO<sub>2</sub> enrichment in greenhouse. *European Journal of Operational Research*, 59, 308-312.

**CHALLA H., SCHAPENDONK A.H.C.M., 1986.** Dynamic optimization of CO<sub>2</sub> concentration in relation to climate control in greenhouses. In: *Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops. Volume I, Status and CO<sub>2</sub> resources*. Enoch H.Z. et Kimball B.A. (Eds.). CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, p. 147-160.

**ENOCH H.Z., KIMBALL B.A.,(Ed.), 1986.** *"Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops"*. CRC Press, Boca Raton. Florida, Vol I, 181 pp; Vol II, 230 pp.

**GARY C., BAILLE A., 1999.** The greenhouse Carbon Cycle. In: *Z. Enoch and G. Stanhill (eds). Ecosystems of the World. The Greenhouse Ecosystem*. Capítulo 12, 287-302.

**KIMBALL B.A., 1986.** Influence of elevated CO<sub>2</sub> on crop yields. In: *Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops"*. Vol. II., Enoch H.Z. et Kimball B.A. (Eds.), CRC Press, Boca Raton.

- MANSFIELDS T.A., MURRIA A.J.S., 1984.** Pollutants generated in greenhouse during CO<sub>2</sub> enrichment. *Acta Horticulturae*. Symposium on CO<sub>2</sub> enrichment, Norway, 171-178, 162 pp.
- SEGINER I., ANGEL A., GAL S., KANTZ D., 1986.** Optimal CO<sub>2</sub> enrichment strategy for greenhouses: a simulation study. *Journal of agricultural Engineering Research*, 34, 285-304.

### [3] *Climatización: Ventilación, Enfriamiento por Evaporación*

- ALDRICH R.A., BARTOK J.W., 1992.** "Greenhouse engineering". Greenhouse Series. Northeast Agricultural Engineering Service. Cooperative Extension, 97 pp.
- ASAE EP406, 1988.** "Heating, ventilation and cooling greenhouses". ASAE standards, Engineering Practice: EP288.4.
- ASHRAE, 1998.** ASHRAE Handbook: refrigeration (serial) ISBN: 1-883413-53-2.
- BAILLE A., 1989.** Greenhouse microclimate and its management in mild winter climates. *Acta Horticulturae*, 246: 23-36
- BAILLE M., BAILLE A., 1993.** Greenhouse soilless crops in mediterranean countries: the need for a better environmental control. In: *Environmental Constraints in Protected Cultivation. Possibilities for new growing techniques and crops*". Ed. P.F. Martinez, EC-DG6, Rep. EUR 15123, p.91-106
- BOULARD T., BAILLE A., 1995.** Modelling air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *J. Agric. Eng. Research*. 61: 37-48.
- BOULARD T., DRAOUI B., 1995.** Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *J. Agric. Eng. Research*, 61, 27-36.
- DÍAZ ALVAREZ J.R., PEREZ PARRA, J. 1994.** "Tecnología de Invernaderos I". Curso Superior de Especialización. 1ª Edición. Díaz Alvarez J.R (Ed.). Fundación para la Investigación Agraria en la provincia de Almería.
- ESMAY M.L., DIXON J.E., 1986.** "Environmental control for agricultural buildings". The AVI Publishing Co., Inc, Westport, CT. 287 pp.
- GUDEHUS H.C., 1976.** Determination of the air exchange figures with regard to closed greenhouses. *Acta Horticulturae*, 76, 301-404.
- HELLICKSON M.A., WALKER J.N., 1983.** "Ventilation of agricultural structures." American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph. Michigan.
- KAMP O.G.H., TIMERMMAN G.J., 1996.** "Computerized Environmental Control in Greenhouses a step by step approach". IPC-Plant, Ede, The Netherlands. 267 pp.
- LÓPEZ J.C., PÉREZ J., MONTERO J.I., ANTÓN A., 2000.** Air infiltration of Almería type greenhouses. *ISHS International Symposium on Protected Cultivation in Mild-winter Climates, Cartagena-Almería, 7-11 March 2000*.
- MATALLANA A., MONTERO J.I., 1995.** "Invernaderos, Construcción y Climatización". Mundi Prensa, (Ed.), 209 pp.
- PÉREZ PARRA, J., CUADRADO CÓMEZ, M.I., 1999.** "Tecnología de Invernaderos II". Curso superior de especialización. 2ª edición. Pérez Parra, Cuadrado Gómez (Eds.), Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. 512 pp.
- RECKNAGEL H., SPRENGER E., HÖNMANN W., SCHRAMEK E.-R., 1995.** "Manual técnico de calefacción y aire acondicionado II: aire acondicionado y frío". ISBN: 84-95279-19-31