

CAPÍTULO 2 III

CONTROL CLIMÁTICO BAJO CONDICIONES PROTEGIDAS

Jorge Eliecer Jaramillo Noreña¹
Viviana Patricia Rodríguez²
Paula Andrea Aguilar Aguilar³
Juan Felipe Restrepo⁴

Las condiciones climáticas locales son determinantes del microclima generado dentro de un invernadero y de su manejo futuro, por lo que su conocimiento previo es necesario al construirlo. El clima de una zona está condicionado por los intercambios radiactivos entre el sol y la tierra. Los elementos más importantes del clima para los invernaderos son: la radiación solar, la temperatura, la humedad, la velocidad y dirección del viento, y las precipitaciones.

El crecimiento y desarrollo de los cultivos está influenciado por el clima, donde los procesos de fotosíntesis, respiración, división y expansión celular, y toma de nutrientes y agua, se ven modificados principalmente por la temperatura, luminosidad, humedad, concentración de dióxido de carbono (CO₂) y concentración de oxígeno (O₂) (López *et al.*, 2001).

A su vez, estos factores están íntimamente relacionados entre sí y actúan sobre el crecimiento vegetativo (Figura 2.1) posibilitando la absorción por raíces y hojas de las soluciones del suelo, en condiciones de humedad óptima y

1. Ingeniero Agrónomo. MSc. Entomología. Investigador y coordinador Red Hortalizas CORPOICA C.I. La Selva. jejaramillo@corpoica.org.co

2. Ingeniera Agropecuaria. Profesional Asistente CORPOICA C.I. La Selva. vipar03@yahoo.es

3. Ingeniera Agropecuaria. Profesional Asistente CORPOICA C.I. La Selva. pagui18@gmail.com

4. Ingeniero Agrícola. MSc. Director técnico Inverca Colombia. frestrepo@centroaceros.com



temperatura controlada; favoreciendo la producción de elementos orgánicos por medio de la fotosíntesis; permitiendo la transpiración del vapor de agua excedente en la planta cuando la humedad no es excesiva y la temperatura es la apropiada; y facilitando la respiración óptima del vegetal en un medio provisto de oxígeno y valores normales de CO_2 , temperatura y humedad relativa (Ferrato y Panelo, 2003).

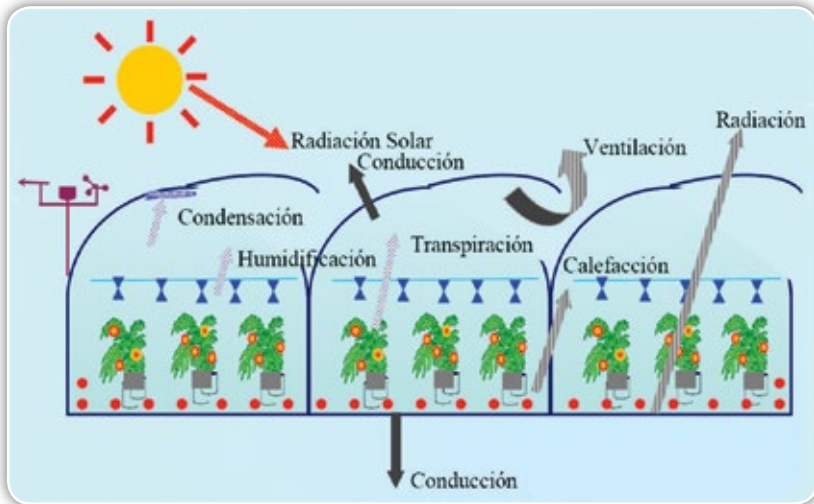


Figura 2.1. Incidencia de factores climáticos sobre las plantas dentro de un invernadero. Fuente: Inverca

El manejo racional de los factores climáticos de forma conjunta es fundamental para el funcionamiento adecuado del cultivo, ya que todos se encuentran estrechamente relacionados y la actuación sobre uno de ellos incide sobre el resto.

Generalmente, las condiciones ambientales de los invernaderos no climatizados distan de ser las óptimas para el normal desarrollo de los cultivos. En ellos, la transmisividad es baja, especialmente en días nublados y lluviosos. Los sistemas de ventilación son ineficientes para mantener unos niveles térmicos e higrométricos aceptables debido, principalmente, a la ausencia o escasez de ventanas cenitales. La deficiente ventilación contribuye a reducir los niveles de CO_2 , con incidencia negativa sobre la producción (Castilla, 1998).

Cuando las condiciones ambientales dentro del invernadero son adversas para el normal desarrollo del cultivo, se debe acudir al control climático (Figura 2.2) (Jaramillo *et al.*, 2007).





Figura 2.2. Efecto invernadero y control climático

El control ambiental está basado en manejar de forma adecuada todos aquellos sistemas instalados en el invernadero (sistema de calefacción, ventilación y el suministro de fertilización carbónica) buscando mantener los niveles adecuados de radiación, temperatura, humedad relativa y nivel de CO₂, para así conseguir la mejor respuesta del cultivo y por tanto, mejoras en el rendimiento, precocidad, calidad del producto y calidad del cultivo (Figura 2.3).



Figura 2.3. Equipos de control climático dentro del invernadero



▶ **VENTAJAS DEL CONTROL CLIMÁTICO**

- Mejora el estado fisiológico de la planta.
- Reduce las enfermedades.
- Reduce los desórdenes fisiológicos.
- Incrementa la producción.
- Adelanta la producción.
- Favorece tanto el manejo integrado del cultivo como el manejo integrado de plagas y enfermedades.
- Es más cómodo para el agricultor.

<http://www.fundacioncajamar.es/estacion/agrdatos/Seminarios/20081029/PresentacionControlClimatico.pdf>.

Temperatura

Normalmente durante el día la temperatura en el invernadero es mayor que en el exterior, pero durante la noche, en la que no existe aporte de radiación solar, el suelo se comporta como un cuerpo negro y emite energía en forma de calor hacia el exterior. Esto es lo que se conoce como 'efecto invernadero'. En la medida en que el material de cubierta del invernadero sea más o menos impermeable a la radiación, esta se reflejará de nuevo hacia el suelo y la temperatura del interior será mayor o menor durante la noche. Cada especie vegetal en las etapas de su ciclo biológico necesita para su desarrollo normal un rango óptimo de temperaturas.

El balance de energía de un invernadero pasivo depende de los aportes o ganancias y de las pérdidas de calor que tenga el sistema (Caldari, 2007; Castilla, 1998).

La temperatura es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Tabla 2.1). Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada.

En el cultivo de tomate, las temperaturas mayores de 32 °C en el día y 22 °C en la noche, o temperaturas por debajo de los 18 °C en el día y de 10 °C en la noche son consideradas perjudiciales para la planta de tomate e interfieren en una adecuada floración y en el proceso de llenado de frutos (Zeidan, 2005).



Tabla 2.1. Exigencias de temperatura para algunas especies hortícolas

	Tomate	Pimentón	Berenjena	Pepino	Melón	Sandía
T° mínima letal	0 - 2	(-1)	0	(-1)	0 - 1	0
T° mínima biológica	10 - 12	10 - 12	10 - 12	10 - 12	13 - 15	11 - 13
T° óptima	13 - 16	16 - 18	17 - 22	18 - 18	18 - 21	17 - 20
T° máxima biológica	21 - 27	23 - 27	22 - 27	20 - 25	25 - 30	23 - 28
T° máxima letal	33 - 38	33 - 35	43 - 53	31 - 35	33 - 37	33 - 37

La temperatura en el interior del invernadero depende de la radiación solar incidente, comprendida en una banda entre 200 y 4.000 nm. El aumento de la temperatura en el interior del invernadero se origina cuando el infrarrojo largo, proveniente de la radiación que pasa a través del material de cubierta, se transforma en calor. Esta radiación es absorbida por las plantas, los materiales de la estructura y el suelo. Como consecuencia de esta absorción, emiten radiación de longitud más larga, y tras pasar por el obstáculo que representa la cubierta emite radiación hacia el exterior y hacia el interior, calentando el invernadero (Caldari, 2007).

El calor se transmite en el interior del invernadero por irradiación, conducción, infiltración y por convección, calentando y enfriando. La conducción es producida por el movimiento del calor a través de los materiales de cubierta del invernadero; la convección tiene lugar debido al movimiento del calor por las plantas, el suelo y la estructura del invernadero; y la infiltración se debe al intercambio de calor del interior del invernadero y el aire fresco del exterior a través de las juntas de la estructura y la radiación, por el movimiento del calor a través de la zona transparente (Caldari, 2007).

Las temperaturas superiores o inferiores al rango óptimo originan estrés térmico sobre la planta e inciden sobre los procesos metabólicos y la producción de materia seca, razón por la que afectan la productividad de los cultivos. La duración temporal y la intensidad del estrés térmico marcan la posibilidad de restablecer la actividad metabólica al nivel inicial, después de volver a unas condiciones más favorables. En unos casos puede producirse una recuperación parcial, en otros se pierde definitivamente esta opción (Castilla, 1998).

Cuando la temperatura desciende por debajo de los 10 - 12 °C, las especies termófilas, entre las que podemos considerar la mayoría de las hortalizas que se cultivan bajo protección, presentan las siguientes alteraciones (Lorenzo, 2001):



- Reducción del crecimiento; especialmente de la elongación, la expansión foliar y, en consecuencia, de la radiación absorbida por el cultivo.
- Disminución de la tasa de asimilación neta.
- Depresión de la respiración.
- Reducción del transporte y distribución de asimilados.
- Disminución de la absorción de agua y sales minerales debido a: aumento de la viscosidad del agua, aumento de la resistencia del tejido de la planta por la disminución de permeabilidad de la membrana celular, reducción de la absorción y acumulación activa de iones, y disminución del crecimiento de la raíz.
- Cambios anatómicos y morfológicos (tendencia a desarrollar hojas más anchas y cortas, reducción de la longitud del pecíolo, aumento del grosor de la hoja y disminución del área foliar específica).
- Pérdida de fertilidad.
- Envejecimiento precoz del tejido fotosintético por necrosis celular.

Los niveles de temperatura que maximizan la producción se sitúan entre 16 y 20 °C para el periodo nocturno, y 22 y 30 °C para el diurno; no obstante, normalmente divergen del óptimo económico debido a los elevados consumos de energía que ellos suponen, haciéndose necesario gestionar el aporte de calor mediante estrategias de manejo climático (Lorenzo, 2001).

El aporte de calor en el interior del invernadero mediante sistemas de calefacción permite el control de la temperatura durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos, como resultado, posibilita programar la producción de fruto. El objetivo final será el control de la temperatura de forma dinámica buscando optimizar el aporte de calor al invernadero, lo que significa maximizar continuamente la diferencia entre la tasa de producción y el consumo energético, modificando la temperatura en función del resultado económico (López *et al.*, 2000).

Radiación

La radiación solar es la fuente de energía para el crecimiento y desarrollo de las plantas y el principal insumo de bioproductividad vegetal. La parte de la radiación solar que es útil para la fotosíntesis de las plantas es designada como “Radiación Fotosintéticamente Activa” o PAR (iniciales de la expresión en inglés). Normalmente denominamos luz a la parte de la radiación solar que es visible para el ojo humano (Castilla, 2001).

Durante el día, una parte de la radiación total que incide sobre la cubierta del invernadero se pierde por reflexión y otra es absorbida por el material de



cubierta. El resto pasa al interior, donde una fracción de la misma es absorbida por la vegetación, por el suelo y por los componentes estructurales del invernadero, y otra es reflejada por los mismos elementos; de esta última, una parte se pierde saliendo a la atmósfera exterior y otra queda retenida en el invernadero. Entonces, la energía total ganada se destina al calentamiento de los elementos estructurales y de cubierta, de la vegetación y del suelo, y además al sostenimiento de los procesos de evaporación y fotosíntesis. Las pérdidas de radiación por reflexión dependen del ángulo de incidencia de los rayos solares con relación a la cubierta, el índice de refracción del material de cubierta y la longitud de onda de las radiaciones (Ferrato y Panelo, 2003).

La fracción de radiación solar global transmitida dentro de un invernadero es designada como transmisividad global del invernadero. Dicha transmisividad es función, entre otros factores, de las condiciones climáticas (principalmente nubosidad, que determina la proporción de radiación directa y difusa), la posición del sol en el firmamento (dependiendo de la fecha y hora del día y de la latitud del lugar), la geometría de la cubierta del invernadero y su orientación (este-oeste, norte-sur), el material de cerramiento (características ópticas y radiométricas, estado de limpieza, condensación de agua en el interior) y de los elementos estructurales y equipos del invernadero que limitan al sombrear la radiación dentro del invernadero (Bot, 1983 y Zabeltitz, 1998 - citados por Lorenzo, 2001).

La transmisividad a la radiación solar directa variará en función del ángulo de incidencia (que forman el rayo solar y la perpendicular a la cubierta del invernadero), siendo la transmisividad mayor cuanto menor sea dicho ángulo; es decir, cuanto más perpendicularmente incida la radiación sobre la cubierta del invernadero (Bot, 1983 - citado por Lorenzo, 2001).

Las pérdidas de radiación por absorción varían con cada material de cubierta en función del espesor y de los componentes de su formulación. Durante el día, también importa el poder de dispersión (difusión) de la luz del material de cubierta. Durante la noche, desde el invernadero se emite radiación infrarroja de onda larga. Cuanto más opaco a la radiación de onda larga sea el material de cubierta, menor será la pérdida por radiación emitida a la atmósfera exterior. El diseño de la estructura y la orientación, junto con el material de cubierta, son los factores que más influyen en el microclima que se genera. La vertiente que mira a la dirección del sol a mediodía, debe ofrecer la mayor perpendicularidad a los rayos solares. Igualmente, la cubierta debe transmitir la máxima radiación solar durante el día y durante la noche debe presentar opacidad máxima a la radiación



infrarroja de onda larga procedente del suelo, de la vegetación y de la estructura del invernadero. Para seleccionar adecuadamente un material de cubierta, es preciso conocer sus propiedades físicas, químicas y ópticas (Ferrato y Panelo, 2003; Castilla, 2001).

A mayor luminosidad en el interior del invernadero se debe aumentar la temperatura, la humedad relativa y el CO_2 para que la fotosíntesis sea máxima; por el contrario, si hay poca luz pueden descender las necesidades de otros factores (Pérez y Cortés, 2007).

Luz

Es un factor imprescindible para llevar adelante una serie de procesos fisiológicos en las plantas; siendo el más importante de todos la fotosíntesis. Los pigmentos vegetales involucrados en este proceso son las antocianinas (azul, roja y púrpura en color), los carotenoides (naranjas y amarillos en color) que absorben 450 - 500 nm (azul y verde) y que pueden cambiar energía con la clorofila para ayudar en la fotosíntesis; y los fitocromos, que absorben la luz roja (660 nm) y la luz roja extrema (730 nm), siendo responsables por la fotomorfogénesis y por las respuestas de fotoperiodismo. Las hojas absorben eficazmente la luz en las longitudes de onda de las regiones del azul (400 - 500 nm) y rojo (500 - 600 nm) del espectro de radiación solar. Los fitocromos, fotorreceptores de las plantas, tienen su máxima sensibilidad en las regiones del rojo (R) y rojo lejano (RL) del espectro. Baja relación R:RL causa una reducción en la proporción de fitocromos que están en la forma activa, y esta reducción estimula la elongación del tallo. La alta relación R:RL favorece la fotosíntesis y, por tanto, hay mayor producción de azúcares y materia seca, estimulando el crecimiento. Las longitudes de onda que las plantas utilizan son llamadas de luz fotosintéticamente activa o PAR (400 a 700 nm, cerca de 45% a 50% de la radiación global).

La luz actúa sobre la asimilación de carbono, la temperatura de las hojas y en el balance hídrico, y además en el crecimiento de órganos y tejidos, principalmente en el desarrollo de tallos, expansión de hojas y en la curvatura de tallos; interviene también en la germinación de semillas y en la floración. La luz y la temperatura están directamente correlacionadas. A mayores niveles de luz hay mayor temperatura, y a mayores niveles de temperatura hay mayor transpiración y consumo de agua. Así mismo, a mayor luminosidad en el interior del invernadero se debe aumentar la temperatura, la humedad relativa (HR) y el gas carbónico (CO_2) para que la fotosíntesis sea máxima; por el contrario, si hay poca luz pueden descender las necesidades de otros factores.



La calidad de la luz varía ligeramente en la naturaleza, principalmente de acuerdo con la localización de la producción o invernadero. Esta tiene influencia en la tasa de fotosíntesis. A mayor altitud, las plantas están más expuestas a longitudes de las fracciones azul y ultravioleta del espectro de radiación, mientras a nivel del mar, la luz es en parte filtrada y su calidad disminuida. Plantas que son cultivadas en una condición o influencia de mucha sombra reciben abundante luz de las fracciones azul y roja, y tienen su crecimiento perjudicado, ya que crecen más largas y delgadas debido a una tasa fotosintética más baja. Por su parte, intensidades de luz muy altas pueden reducir el crecimiento por resultado de un 'estrés hídrico' (Caldari, 2007).

La intensidad de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se reduce por varios factores variables, entre ellos, la absorción de la radiación, en intervalos de longitud de onda específicos por los gases de la atmósfera, dióxido de carbono, ozono, etc.; el vapor de agua, por la difusión atmosférica por la partículas de polvo, moléculas y gotitas de agua; y la reflexión de las nubes, por la inclinación del plano que recibe la radiación respecto de la posición normal de ella (Caldari, 2007).

Humedad Relativa

La humedad relativa (HR) es la masa de agua en unidad de volumen o en unidad de masa de aire y es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura. Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad, por lo que a elevadas temperaturas aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto disminuye la HR. Con temperaturas bajas, el contenido en HR aumenta (Castilla, 1998).

Cada especie tiene una humedad ambiental idónea para desarrollarse en perfectas condiciones: en el tomate, el pimentón y la berenjena la humedad relativa óptima está sobre el 50% - 65%; en el melón, entre el 60% - 70%; en el calabacín, entre el 65% - 80% y en el pepino entre el 70% - 90%.

La humedad del aire es un factor climático que puede modificar el rendimiento final de los cultivos. Cuando la humedad es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, por lo que pueden deshidratarse, además de los comunes problemas del mal cuajado de los frutos.



Para que la humedad relativa se encuentre lo más cerca posible de lo óptimo, el agricultor debe ayudarse del higrómetro. El exceso puede reducirse mediante ventilado, aumento de la temperatura y evitando el exceso de humedad en el suelo. La falta puede corregirse con riegos, llenando recipientes de agua y pulverizando agua en el ambiente. En estos casos, la ventilación cenital en invernaderos con longitud superior a 40 cm es muy recomendable, tanto para el control de la temperatura como de la HR (Pérez y Cortés, 2007).

CO₂ en Invernaderos

Uno de los factores determinantes de la producción de cultivos protegidos es la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera del invernadero. El carbono es un elemento fundamental para la vida, ya que comprende alrededor del 40% - 50% de la materia seca de los organismos vivos, y lo adquieren las plantas del ambiente en forma del CO₂ tomado del aire (Lorenzo, 2001). Dicho CO₂ entra a las plantas por los poros (estomas) de las hojas cuando este es asimilado por los carbohidratos y otras sustancias de la planta (Bakker, Bot, Challa y Van De Braak, 1995).

Los niveles de concentración de CO₂ en un invernadero son usualmente diferentes a los de afuera y están sujetos a una concentración fluctuante (Lorenzo, 2001). En invernaderos es comúnmente observado que la concentración de CO₂ disminuye por debajo del nivel ambiental, lo que también es llamado 'agotamiento', el cual es causado por el dióxido de carbono tomado por el cultivo y la insuficiencia de flujo del mismo (ninguna fuente y poco aire para refrescar); esto se remedia mediante el aporte externo de aire por ventilación o alguna fuente artificial de CO₂ (Figura 2.4). En el caso de agotamiento del CO₂, el intercambio de aire implica flujo de este (Bakker *et al.*, 1995).

El agotamiento de dióxido de carbono se incrementa cuando la tasa de asimilación neta del cultivo es elevada (alta radiación, dosel vegetal cerrado) y la renovación del aire en el interior de las estructuras es baja (baja velocidad del viento en el exterior) (Lorenzo, 2001).

La incorporación de mallas anti-insectos en las ventanas del invernadero para proteger los cultivos de plagas y enfermedades reducen considerablemente la tasa de ventilación del invernadero; estas barreras físicas dificultan el intercambio de aire interior-exterior y la renovación de CO₂. La ventilación natural en muchos casos resulta insuficiente para restablecer la concentración del dióxido en el interior de las estructuras de cultivo, especialmente cuando se producen altas tasas de asimilación (Lorenzo, 2001), siendo necesaria la utilización de ventilación forzada.





Figura 2.4. Sistema de aplicación de CO₂

La elevación adicional de la concentración de CO₂ se intenta a menudo solamente cuando la tasa de ventilación no es adecuada. El nivel óptimo es cerca de dos a tres veces el nivel ambiente, 350 ppm; y el método más simple y económico de reducir el agotamiento del CO₂ es aumentar el intercambio de aire.

El nivel de dióxido de carbono que se puede mantener en un invernadero por el enriquecimiento depende de varios términos en su balance, la tasa de la fuente, la tasa de intercambio con el exterior, su asimilación por el cultivo y la producción de este por la degradación de material orgánico.

Este gas de la atmósfera también se puede controlar en el ambiente de los invernaderos. La disminución de la concentración de CO₂ depende del número de renovaciones que se realicen de la atmósfera confinada y de la actividad fotosintética. El contenido de CO₂ por la noche es alto debido a la respiración de las plantas, pero no causa preocupación; en las primeras horas de luz solar es cuando la concentración es mayor. En las horas del mediodía y posteriores, la concentración disminuye (Bakker *et al.*, 1995).

Los niveles aconsejados de CO₂ dependen de la especie o variedad cultivada, así como de la radiación solar, la ventilación, la temperatura y la humedad. El óptimo de asimilación está entre los 18 y 23 °C de temperatura, descendiendo por encima de los 23 a 24 °C. Respecto a la luminosidad y humedad, cada especie vegetal tiene un óptimo distinto (Pérez y Cortés, 2007).

Conducción/convección

A lo largo del día, el suelo acumula energía (por conducción) que restituye en gran parte durante la noche.



En la estructura y las cubiertas exteriores los intercambios con el ambiente exterior son principalmente por convección. La transferencia de calor por conducción es escasa a través del material de cubierta y puede ser mayor cuando es una estructura metálica. Las pérdidas por convección aumentan con la velocidad del aire exterior y la consiguiente turbulencia del aire exterior e interior.

Las roturas de la cubierta facilitan fugas por convección del aire cálido y húmedo del invernadero (Ferrato y Panelo, 2003); por su parte, las pérdidas por conducción/convección y fugas se pueden reducir notablemente con la utilización de cortinas laterales.

Condensación/evaporación

Si el contenido de vapor de agua en el invernadero es constante, entonces la humedad relativa aumenta al bajar la temperatura y disminuye al subir la temperatura del aire. Un aspecto positivo a destacar es que durante la noche el vapor de agua que se condensa sobre la superficie interna fría de la cubierta cede calor sensible al invernadero; el aspecto negativo es que en condiciones de humedad relativa elevada se favorece la condensación en el interior del invernadero, lo que facilita el desarrollo de enfermedades criptogámicas (Ferrato y Panelo, 2003).

Evapotranspiración

La evaporación del agua desde el suelo más la transpiración de las plantas se realizan tomando energía del medio; así mismo la disminución de la radiación puede reducir la transpiración de las plantas. Durante el día, la elevación de la temperatura puede disminuir la humedad interior provocando estrés hídrico en el cultivo. Cuando la transpiración es intensa, puede haber una concentración de sales en los puntos donde se realiza la fotosíntesis y quedar disminuida esta función (Ferrato y Panelo, 2003).

DIFERENTES MANERAS DE CONTROLAR EL MICROCLIMA DE UN INVERNADERO

Aprovechamiento del calor natural

La construcción: en zonas frías y donde es necesario mantener el calor en el invernadero, la construcción debe poder cerrarse herméticamente. Las aberturas se cubren con cortinas que pueden abrirse en el día y cerrarse durante la noche. Generalmente hay que cerrar las cortinas en la tarde (algo como dos



horas antes de que caiga el sol). Esta modalidad permite mantener el calor (energía) del día para la noche. En días fríos, se pueden dejar las cortinas cerradas todo el tiempo, pero hay que cuidarse de la humedad; en la mañana, si se espera un día soleado, es mejor abrir las cortinas temprano, de tal manera que favorezca la aireación y la penetración de CO₂ al invernadero (Shany, 2007).

La altura del invernadero: en invernaderos que son más altos no solamente la aireación es mejor, sino también, como ya hemos mencionado, el microclima general es más templado; es decir, menos caluroso durante el día y a la vez menos frío por la noche. La explicación es que existe un volumen más grande de aire captado dentro del invernadero y que este cuerpo de aire necesita más tiempo para calentarse durante el día, pero también se enfría más lentamente durante la noche. Teniendo en cuenta el mismo concepto, en un invernadero alto no hay que invertir más energía para la calefacción, pues la diferencia entre la temperatura que existe dentro de la construcción y la que requiere el cultivo es menor (Shany, 2007).

En noches de heladas, generalmente noches despejadas en las cuales se presenta el fenómeno de inversión térmica, si no hay calefacción la temperatura dentro de la construcción (especialmente en construcciones pequeñas y bajas) puede ser menor que la exterior, por la falta de movimiento de aire dentro del invernadero. Si la construcción está ubicada en el lugar bajo, el cultivo está destinado a ser más afectado por las heladas (el aire frío se acumula en sitios bajos). Esta es otra razón para construir invernaderos de mayor altura y ubicación en sitios más altos (Shany, 2007).

Tipo del plástico de la cobertura: en zonas frías donde es importante mantener calor en la noche, hay que usar únicamente plástico de tipo IR (bloqueador de la radiación infrarroja). Este plástico tiene la capacidad de bloquear la radiación infrarroja (calor) y evitar su escape del invernadero; incluso, en invernaderos calefaccionados se ahorra energía si se usa plástico del tipo IR.

Aireación y ventilación

La ventilación es un aspecto fundamental a tener en cuenta para el óptimo desarrollo del cultivo, por ello es muy importante tanto expulsar el aire caliente como hacer que circule dentro del recinto, sobre todo a la hora de evitar plagas y enfermedades. De una correcta ventilación puede depender el éxito de un cultivo, por eso la importancia de su manejo de acuerdo con las condiciones del clima exterior y con las necesidades de los cultivos (Shany, 2007).



Entre los problemas más graves que se presentan dentro de los invernaderos están la acumulación de calor y la acumulación de humedad. La alta humedad relativa es, sin lugar a dudas, el factor principal que favorece la aparición de enfermedades del follaje y de los frutos (Shany, 2007). La escasa ventilación es responsable de los excesos térmicos del invernadero durante el día y la ausencia de ventilación cenital dificulta la renovación de aire para reducir la temperatura interior (Castilla, 1998).

La aireación del invernadero tiene como meta, además de bajar la temperatura, bajar la humedad dentro del invernadero. Las horas más importantes para esta actividad son las de la mañana, cuando sale el sol y comienza la evapotranspiración. A estas horas, el aire está todavía frío y su humedad relativa dentro de la construcción puede llegar al 100%. Ya en áreas templadas, donde hay gran diferencia entre las temperaturas de la noche y del día, la humedad en el invernadero es muy alta también en la noche. Esta tendencia ocurre especialmente en invernaderos calefaccionados. En tales condiciones, es necesario ventilar también en la noche. Muchas veces existe cierto ‘antagonismo’ entre la necesidad de aireación y la de calefacción; sin embargo, hay que airear aún si se pierden algunos grados de temperatura en ciertos momentos. El daño por alta humedad puede ser más grave, en cambio, los grados “perdidos” de temperatura se recuperan rápidamente (Shany, 2007).

Métodos de aireación

- Según características del invernadero:

- La ubicación. Mediante una buena ubicación se puede conseguir una buena aireación del invernadero y a menudo ahorrar la necesidad de invertir en aireación artificial. Para este propósito, siempre es importante ubicar el invernadero en un lugar alto, libre de obstáculos y expuesto a la ventilación natural.
- La altura. Una mayor altura permite una mejor aireación y al mismo tiempo temperaturas más bajas durante el día.
- La longitud máxima del invernadero (dada por el número de naves o túneles). No debe superar los 32 m si no tiene algún tipo de ventilación cenital ni una adecuada ventilación lateral. Cuando la longitud de las naves es mayor, es indispensable agregar ventiladores internos y extractores que aseguren un adecuado recambio del aire.



- Instalación de cortinas. En cualquier tipo de invernadero deben incluirse cortinas móviles y aberturas fijas (ventanas), si es que no hay problemas de muy bajas temperaturas durante la noche; en este caso, se requiere sellar bien el invernadero y colocar un sistema de calefacción.
- Aberturas del techo. En zonas cálidas y tropicales son recomendables las construcciones que tienen aberturas (ventanas cenitales) también en el techo. De estas aberturas verticales sale el mayor volumen del aire caliente del invernadero, ya que este siempre sube. Además, a nivel de la abertura el movimiento del viento fuera del invernadero produce un efecto Venturi, que aspira el aire cálido hacia afuera de la construcción. En este tipo de construcción se permite una longitud de la nave mayor de 32 m, siempre asegurando una altura mínima de 4 o 5 m de la columna, y ojalá la incorporación de ventiladores.

En muchas ocasiones es suficiente hacer uso de los métodos arriba mencionados, sin ser necesaria una mayor inversión en un sistema mecánico de aireación (Shany, 2007).

- Ventilación. Consiste en la renovación de aire dentro del invernadero, actuando así sobre la temperatura, humedad relativa, el contenido de CO₂ y el oxígeno que hay dentro del mismo. La ventilación puede ser natural o forzada.

Dentro de los factores que intervienen en la formación del microclima al interior de un invernadero, es quizás la ventilación el aspecto más discutido y en el que más atención prestan los especialistas involucrados en la tecnología de producción bajo condiciones controladas.

La ventilación afecta, en primer lugar, la temperatura interna. Todos los fenómenos fisiológicos están fuertemente influenciados por este factor. De igual modo, es casi siempre la principal variable climática que se contempla a la hora de implantar un cultivo en una zona determinada. Los invernaderos necesitan evacuar el exceso de calor que se produce en los momentos de alta insolación. La ausencia de ventilación cenital dificulta la renovación de aire para reducir la temperatura interior (Castilla, 1998).

En segundo lugar, la falta de ventilación incide también negativamente en la composición del aire interior, principalmente al producirse déficit en la concentración de CO₂. Es común que los agricultores que usan cubiertas o invernaderos suelen pensar en la ventilación siempre en función de la temperatura, algunas



veces de la humedad relativa, pero poca o ninguna atención prestan al hecho de que la ventilación también tiene una importancia relevante en el nivel de concentración de dióxido de carbono del aire del invernadero. Bajo invernadero, la tasa de asimilación de dióxido de carbono de un vegetal desarrollado puede alcanzar 3 g por hora y por metro cuadrado de suelo. Una elevada actividad fotosintética provoca una caída de concentración de CO₂ del aire que debe compensarse con una entrada de aire del exterior a través de la acción de la ventilación (Alarcón, 2000).

La falta de ventilación, sobre todo en los momentos de más bajas temperaturas, provoca excesos de humedad (el tercer factor climático), favoreciendo la condensación al interior de las cubiertas y el goteo sobre cultivos; por esto también se crean ambientes óptimos para la proliferación de enfermedades fungosas asociadas a altas humedades relativas y presencia de agua libre (Alarcón, 2000).

La ventilación en el invernadero puede ser de forma natural o ventilación mecánica o forzada (Alarcón, 2000).

Ventilación natural. La ventilación es denominada 'natural' cuando son solamente las fuerzas exteriores naturales las que actúan sobre el intercambio del aire interior con el aire exterior. El flujo de aire tiene como fuerza motriz la diferencia de presión que se establece entre ambos lados de la ventana. Esta diferencia de presión tiene su origen en dos procesos diferentes: la influencia del viento (presión dinámica) y la influencia de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, que genera una diferencia de densidad y, por consiguiente, de presión.

La ventilación natural se basa en la disposición en las paredes (laterales) y en el techo del invernadero (cenitales) de un sistema de ventanas que permite la aparición de una serie de corrientes de aire, las cuales contribuyen a disminuir las temperaturas elevadas y a reducir el nivel higrométrico.

Una ventana cenital de una determinada superficie resulta, a efectos de aireación, hasta ocho veces más efectiva que otra situada lateralmente de igual superficie. Normalmente, las ventanas deben ocupar entre un 18% y un 22% de la superficie de los invernaderos, teniendo en cuenta que con anchuras superiores a los 20 m será imprescindible disponer de ventilación cenital que mejore la aireación lateral.

La ventana cenital puede ser fija, batiente o enrollable; la fija es la más usada por su bajo costo, pero permite poca área de ventilación (Figura 2.5).





Figura 2.5. Ventana cenital fija

Por otro lado, la ventana cenital batiente tiene un mecanismo de apertura electrónica y automática, recomendada en cultivos que no toleran la exposición directa al sol, y permiten mantener un porcentaje de apertura a pesar de la lluvia (Figura 2.6).



Figura 2.6. Ventana cenital batiente

La ventana cenital enrollable permite maximizar el aprovechamiento de la luz solar (Figura 2.7). Otorga mayor porcentaje de área de ventilación. Se recomienda combinar con ventilaciones cenitales fijas, porque estas se deben cerrar en su totalidad en caso de lluvia.





Figura 2.7. Ventana cenital enrollable

El objetivo de las ventanas laterales y frontales es permitir el ingreso de aire nuevo al invernadero, donde el mecanismo de operación puede ser descendente o ascendente. Estas se pueden operar manualmente o mecánicamente (Figuras 2.8 y 2.9).



Figura 2.8. Ventana lateral descendente



Figura 2.9. Ventana lateral enrollable

Las tasas de ventilación recomendadas internacionalmente están entre 0,75 y 1 renovaciones por minuto, de acuerdo con la Asae (1991). Por regla general, una ventilación eficiente exige que se diseñe el invernadero con una superficie total de apertura de las ventanas de 0,20 a 0,25 veces la superficie del suelo (Alarcón, 2000).

En el caso colombiano, las diferentes formas de cubiertas utilizadas para los cultivos de flores y hortalizas generalmente no satisfacen las necesidades de ventilación. Esto se debe a que en su gran mayoría este tipo de estructuras se ha diseñado teniendo como principal parámetro de selección el precio, descuidando de plano las características térmicas, de transmisión de luz y de ventilación.



En las estructuras de guadua, por ejemplo, en la mayoría de los casos el área destinada a ventilación con respecto al área cubierta no supera el 12%; en casos como las cubiertas espaciales no supera el 10%; y nuestras estructuras tradicionales normalmente no se acercan siquiera a los valores mínimos establecidos por las normas internacionales al respecto (20% a 25%).

Es por esto que muchas veces las cubiertas son un limitante para alcanzar mayores niveles de productividad, y en vez de ser una solución se convierten en un problema, tal como tratar de bajar temperatura colocando pantallas de sombreado (limitando la entrada de luz) o regando en exceso (generando ambientes para el establecimiento de enfermedades).

Sugerencias para mejorar la ventilación natural

- Lo primero que debe considerarse a la hora de la implementación de un invernadero es cómo está relacionado su diseño con los factores preponderantes en el microclima que se creará al interior de este.
- La altura es importante, debe ser lo más homogénea posible, en general una altura promedio de 4 m, lo que ayuda a generar buenas inercias térmicas y a mejorar el efecto térmico de la ventilación.
- Las ventanas deben presentar la menor resistencia posible al paso del aire. En este sentido, las ventanas cenitales deben ser en lo posible mecanizadas, para que no cumplan solo con el objetivo de evacuar aire caliente, sino que también sirvan de entrada para corrientes de aire que aumenten la eficiencia del recambio.
- Si se tienen únicamente ventanas fijas, puede ser conveniente construir las ventanas de las naves de los extremos orientadas siempre hacia el exterior, de manera que venga el viento en un sentido u otro y la primera ventana siempre esté de cara al viento. Esta consideración debe tenerse en cuenta en zonas donde las velocidades del viento no superen los 30 km/hr, para evitar daños a la estructura y al material de cubierta.
- En el caso de las ventanas mecanizadas, la mejor opción de ventilación son las ventanas cenitales enrollables, pues con ellas se alcanza casi un 43% de área destinada a ventilación con respecto al área cubierta, y genera recambios cercanos a los de los recomendados por los estándares internacionales. Debe tenerse en cuenta si el cultivo admite la libre exposición a la luz del sol.



- En lo posible se deben evitar las mallas anti-insectos, ya que limitan en gran medida la ventilación si no se cuenta con un sistema de ventilación forzada.
- Para el caso de cultivos en los que el paso directo de la luz solar sea un limitante, la mejor opción son las ventanas batientes que generan alrededor de un 25% a 30% de área destinada a ventilación, permitiendo aperturas mínimas incluso en caso de presencia de lluvia.
- Adquirir invernaderos durables donde se pueda comenzar el proyecto productivo con sistemas de ventilación convencionales y que a su vez permita hacer modificaciones y mejoras tecnológicas a medida que avanza el tiempo, es decir, invernaderos que permitan hacer inversión en nuevas tecnologías encaminadas a mejorar el proceso productivo.

La ventilación natural en los invernaderos es entonces la característica básica para gestionar el clima ideal de nuestros cultivos, y no se debe tratar como un tema secundario si se quieren alcanzar niveles máximos de eficiencia.

Herramientas de control climático

Existen unos equipos o herramientas con los que se pueden manipular las condiciones climáticas dentro del invernadero, cuya función principal es aumentar o disminuir la temperatura y la humedad relativa, y equilibrar el nivel de gas carbónico (CO_2).

Ventilación forzada . Los sistemas de ventilación forzada establecen una corriente de aire mediante ventiladores extractores o recirculadores, en donde se extrae aire caliente del invernadero y el volumen extraído es ocupado inmediatamente por aire de la atmósfera exterior para reducir la temperatura y la humedad relativa.

Con este sistema solamente se puede conseguir una temperatura idéntica a la del exterior, pero su control es más preciso que el que se logra con la ventilación pasiva (Figura 2.10) (www.abcagro.com). Para obtener un reemplazo eficiente del aire cálido y húmedo por aire fresco y más seco, la velocidad mínima de la entrada de este debe ser de 1,6 m/s (se refiere al aire que entra por el lado opuesto de los ventiladores).

El volumen de aire que hay que cambiar para mantener una diferencia máxima de 3 °C entre la temperatura de afuera y la del interior del invernadero, es





Figura 2.10. Extractor de aire caliente

de 160 m^3 por m^2 por hora. Esto se logra mediante el uso de ventiladores industriales de 48" de diámetro, debiendo colocarse como mínimo un ventilador por cada 250 m^2 . Los ventiladores se instalan en la pared del invernadero siguiendo la dirección del viento natural. La función de los ventiladores es únicamente extraer aire del invernadero y nunca empujar aire para adentro, por eso se llaman "extractores de aire". Es importante mencionar que estos extractores tampoco pueden extraer el aire de una construcción cuya longitud sea mayor de 32 m (construcciones con ventiladores no deben superar la longitud de 32 m).

En invernaderos controlados por computación, el computador puede operar los ventiladores automáticamente según el programa ingresado.

Otro aspecto fundamental relacionado con la aireación del invernadero, especialmente en zonas frías donde las construcciones están cerradas herméticamente, es el suministro de CO_2 al cultivo. La concentración de este elemento es esencial para el proceso de la fotosíntesis en las plantas y desciende rápidamente en invernaderos cerrados.

En relación con la operación de los ventiladores, es importante mencionar que mientras estos están funcionando deben cerrarse las cortinas dejando una sola pequeña abertura de 25 cm; en caso contrario, los ventiladores atraen el aire únicamente del lugar más cercano a su ubicación y no se consigue la aireación de todo el invernadero. Si hay aberturas en el techo también deben cerrarse (con cortinas de plástico), al tiempo que los ventiladores están en marcha.

Considerando el aspecto fitosanitario del cultivo, lo mejor es colocar en la pared externa (donde está ubicado el ventilador) una cortina de malla mosquite-



ra o un ducto de sellamiento, a fin de evitar la entrada de insectos pequeños por esta abertura cuando el ventilador no está en actividad (esta malla juega cierto papel de resistencia a la corriente de aire). Una solución técnica es instalar junto con el ventilador una cortina de plástico, que automáticamente se abre cuando el ventilador está funcionando y se cierra en cuanto termina su operación.

También se pueden instalar ventiladores secundarios (Figura 2.11) dentro del invernadero colocados a la altura de las columnas (una altura aproximada de 3 m por encima del suelo). Estos ventiladores que son más pequeños (36”), ayudan a empujar el aire a lo largo de la construcción bajando la humedad y secando el agua acumulada sobre las plantas (según la ley física, a una dada humedad relativa el aire será más seco si está en movimiento). Estos ventiladores secundarios no son suficientes para airear el invernadero, pero son buenos como complemento adicional de los extractores principales. Tienen además otra función, que es la distribución de los productos químicos vaporizados (método de vaporización) en el espacio del invernadero.

Donde hay aberturas en el techo generalmente no se instalan extractores de aire sino ventiladores internos (Shany, 2007).



Figura 2.11. Ventilador para facilitar la circulación del aire

La función de los ventiladores en el invernadero es principalmente extraer el exceso de calor y humedad fuera de la construcción; en cambio, no son eficientes para bajar la temperatura del invernadero, especialmente cuando la temperatura afuera también es alta. En zonas secas y cálidas, y en cultivos sensibles a altas temperaturas, hay que refrescar el espacio del invernadero con técnicas adicionales. Existen varios métodos para este propósito, los cuales se describirán a continuación:



Sombreado. En cultivos que no son exigentes al suministro de la luz o que en una etapa de su desarrollo permiten menor iluminación (por ejemplo, el pimentón en etapa de maduración) se puede sombrear la construcción con un zarán negro colocado encima del plástico (de 30% a 40% de sombra) o usar la cortina térmica del techo con el mismo objetivo (Figura 2.12). Esta cortina, hecha de un zarán combinado de polietileno y aluminio, se coloca dentro del invernadero a la altura de las columnas (4 cm) evitando la pérdida de calor durante la noche (Shany, 2007).



Figura 2.12. Sombreado externo en pimentón

Así como una razón adicional para sombrear cultivos es reducir la intensidad de la radiación solar con el propósito de evitar las quemaduras del sol sobre los frutos, otra manera de sombrear el cultivo y bajar la temperatura es pintar los techos plásticos de los invernaderos con una pintura blanca agrícola, produciendo alrededor de 28% de sombra (Figura 2.13). En países tropicales donde la nubosidad es común y la radiación solar es baja no es muy recomendable usar este método de sombreado porque se reduce aún más el suministro de la luz a los cultivos.



Figura 2.13. Plásticos con pintura blanca en la superficie



Microaspersores. Una manera más eficiente para bajar temperaturas es el uso de los microaspersores (Figura 2.14).



Figura 2.14. Microaspersor

Su principio es convertir calor efectivo a calor potencial (otro tipo de energía) a través de la evaporación del agua. La desventaja es que producen gotas relativamente grandes, las cuales pueden, en algunas ocasiones, mojar el follaje del cultivo y provocar enfermedades. De la misma forma, el rápido secado de las gotas puede dejar manchas de sal, las cuales causan quemaduras. Si la fuente del agua es muy buena y se opera el sistema durante algunos minutos cada vez, es posible evitar estos problemas y recibir buenos resultados, especialmente cuando se los opera junto con los ventiladores o los extractores de aire, ayudando a un rápido secado del agua y a un mejor enfriamiento del aire.

Una limitación del sistema es cuando hay que operarlo con mayor frecuencia (agregar más agua al espacio del invernadero) para sobrellevar altas temperaturas; en este caso, hay peligro de que el follaje del cultivo también se moje. Es preferible el empleo de *foggers*, que bajo el mismo principio y con menores cantidades de agua libre y menor tamaño de gota tienen un gran efecto en el control de la temperatura en momentos de baja humedad relativa, aunque el sistema de microaspersores es más barato y sencillo.

Nebulización (*foggers*). Consiste en distribuir en el aire un gran número de partículas de agua líquida de tamaño próximo a 10 micras (Figura 2.15). De-



bido al escaso tamaño de las partículas, su velocidad de caída es muy pequeña, por lo que permanecen suspendidas en el aire del invernadero el tiempo suficiente para evaporarse sin llegar a mojar a los cultivos (Martínez, 2001).



Figura 2.15. Nebulización

Se basa en el mismo principio descrito para los microaspersores, pero estos producen por sobre el follaje del cultivo una nube de gotas muy finas (micrones) que se evaporan antes de llegar a mojar las plantas (Figura 2.16). Al evaporarse, absorben energía del aire disminuyendo así la temperatura del invernadero. Una parte esencial del sistema son las aberturas del techo y los extractores de aire para permitir un eficiente reemplazo de aire dentro de la construcción y un rápido secado del agua (el movimiento del aire es desde las aberturas del techo –entrada– hacia los extractores –salida–) (Martínez, 2001).



Figura 2.16. Microaspersor para nebulización



Los nebulizadores se colocan a una altura de 4 m (1 m por encima del follaje del cultivo), y es suficiente una hilera por galpón. Funcionan de manera intercalada, según la temperatura del invernadero (por ejemplo, 30 segundos cada 15 minutos). Se puede conectar el sistema a un controlador de riego, a la computadora del invernadero o a un simple *timer* de tipo 'galcón'.

Existe una fórmula que permite calcular el volumen de agua que debe suministrarse para bajar la temperatura del invernadero, fórmula que es complicada y poco práctica para el manejo diario del invernadero. Un factor importante a tener en cuenta es que, mientras más seco esté el aire fuera y dentro del invernadero, más fácil y eficiente será el proceso de la reducción de la temperatura, pues más agua se podrá agregar al aire sin elevar demasiado la humedad relativa (según la física de la psicometría). Esto significa que en condiciones tropicales será más complicado el manejo de la temperatura del invernadero.

Ahora bien, el sistema de nebulizadores es complicado y caro, ya que se requiere de la instalación de sistemas de alta presión (por encima de 1.000 PSI) o de la instalación de un compresor (sistema de desplazamiento de aire donde se asegura el pequeño diámetro de la gota) y de la necesidad de usar agua pura (tratada) con el fin de evitar el taponamiento de los orificios finos de los inyectores de agua (algunos micrones de diámetro). No obstante, es hoy en día uno de los sistemas más eficientes para disminuir la temperatura del invernadero.

Para el buen funcionamiento de nebulizadores o microaspersores, es conveniente que existan aberturas en el techo del invernadero y extractores de aire (Shany, 2007).

Colchón húmedo. Se trata de una pantalla de material poroso que se satura de agua por medio de un equipo de riego (Figura 2.17). La pantalla se sitúa a lo largo de todo el lateral o un frontal del invernadero. En el extremo opuesto se instalan ventiladores eléctricos. El aire pasa a través de la pantalla porosa, absorbe humedad y baja su temperatura. Posteriormente, es expulsado por los ventiladores.

Los ventiladores son una parte esencial del sistema. Mientras estos están en funcionamiento fuerzan el ingreso del aire desde la pared opuesta; por eso, se recomienda no tener aberturas en el techo o mantenerlas (así como las laterales) permanentemente cerradas mientras el sistema esté en marcha.





Figura 2.17. Colchón húmedo

El colchón actúa como un radiador y es el sistema más eficaz pero a la vez el más costoso. Requiere suministros permanentes de agua de buena calidad y se justifica únicamente en cultivos especiales y de alto valor. Para la evaluación económica deben tomarse en consideración dos puntos: por un lado, para abaratar costos se evalúa colocar el colchón en la pared más corta de la construcción; por otro, hay que tomar en cuenta que no es recomendable una distancia mayor de 32 m dentro de los extractores del aire del colchón.

El colchón húmedo es un sistema muy adecuado para zonas áridas y secas, no así para zonas tropicales, ya que aumenta humedad al ambiente de la construcción justamente donde es necesario bajarla.

El funcionamiento del colchón y los ventiladores tiene que estar sincronizado. Los ventiladores comienzan a operarse algunos minutos antes que el colchón (el funcionamiento del colchón sin los ventiladores no tiene sentido). Esta operación también puede ser controlada automáticamente por el controlador computarizado. Si el control es por temperatura, se puede programar el inicio de la operación de los ventiladores a 28 °C, mientras la del colchón se puede programar a 30 °C (Shany, 2007).

Calefacción. En zonas frías o áreas donde parte del año o parte del día las temperaturas son bajas, deben usarse diferentes medios para mantener y aumentar el calor del invernadero. Muchos cultivos son exigentes a ciertos valores de temperatura para su crecimiento, cuaje y producción, tal como las solanáceas (pimentón, tomate, berenjena) y las cucurbitáceas (melón, pepino, zapallo). Las temperaturas menores afectan el cultivo. Según la necesidad del cultivo y las condiciones climáticas de la región, debe escogerse el método más adecuado de calefacción.



En muchas ocasiones, un diseño racional de la construcción y la selección correcta de los materiales de cobertura son suficientes para aprovechar el calor natural del invernadero, sin necesidad de tener que instalar aparatos adicionales. En otros casos, cuando la diferencia entre la temperatura externa y la que requiere el cultivo es más grande, hay necesidad de aumentar la temperatura con medios adicionales de calefacción. Aquí, un diseño adecuado y uso apropiado de materiales pueden ahorrar mucha energía y evitar gastos exagerados (Shany, 2007).

Las mangas de polietileno. Este sencillo y económico método se compone de mangas de polietileno transparente llenas con agua y cerradas en sus extremos. El diámetro de las mangas es de 40 cm y deben estar distribuidas en toda el área del invernadero a lo largo de las hileras del cultivo. En general, se coloca una manga por cada 4 camas. El principio es que el agua en las mangas absorbe calor durante el día, el cual se libera durante la noche, elevando así la temperatura del invernadero. Al día siguiente, el agua en las mangas comienza nuevamente a absorber calor bajando la temperatura dentro de la construcción. Dicho principio es como de un 'radiador-contenedor de energía'. El plástico de las mangas debe ser transparente, pues el calentamiento principal del agua durante el día es a través de la radiación solar.

Sistemas de calefacción

Sistemas de calefacción de tipo convectivo. Son sistemas en los que el elemento conductor del calor es el aire. Debido a su poca inercia, proporcionan un aumento rápido de la temperatura del aire, enfriándose de igual forma al dejar de actuar. Generan importantes gradientes térmicos y pérdidas de calor al ir localizados, normalmente, sobre el cultivo (López *et al.*, 2001; Martínez, 2001).

Entre los sistemas convectivos, los más utilizados son: aerotermos (Figura 2.18), generadores de aire caliente de combustión indirecta y generadores de aire caliente de combustión directa. Dichos sistemas proporcionan un aumento rápido de la temperatura del aire, enfriándose igualmente cuando dejan de actuar; del mismo modo generan importantes gradientes térmicos y pérdidas de calor al ir localizados normalmente sobre el cultivo. El costo de la instalación es inferior al de los sistemas por agua caliente. Tienen una vida útil corta (López *et al.*, 2000).

Los sistemas de calefacción de tipo convectivo tienen la ventaja de ser de menor inversión económica y mayor versatilidad al poder usarse como sistema



de ventilación, con el consiguiente beneficio para el control de enfermedades. Como inconveniente puede citarse que proporcionan una deficiente distribución del calor, creando a veces turbulencias internas que ocasionan pérdidas caloríficas (menor inercia térmica y uniformidad).

Entre los mencionados sistemas, los generadores de aire caliente de combustión indirecta y de combustión directa son los más utilizados. En los generadores de aire caliente de combustión indirecta, mediante un cambiador de calor se separan los gases de combustión expulsándolos al exterior e introduciendo únicamente aire caliente al invernadero. Dado que parte del calor es expulsado con los gases de combustión, el rendimiento de estas máquinas suele estar entre el 80% y el 90%.

Por su parte, en los generadores de aire caliente de combustión directa, tanto el aire caliente como los gases de combustión son incorporados al invernadero, proporcionando un aporte de calor y CO₂ (ideal para favorecer la función clorofílica de las plantas). El combustible a utilizar debe contener el menor número posible de elementos tóxicos, siendo el propano y el gas natural los más recomendados. Es importante controlar los niveles de los gases de combustión para evitar problemas a personas y plantas (López *et al.*, 2001)

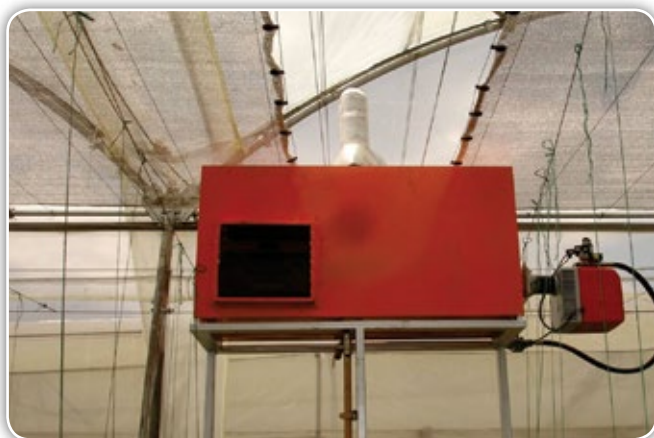


Figura 2.18. Sistema de calefacción por aire caliente

Sistemas de calefacción por convección y radiación. La transferencia de calor se realiza a través de tuberías aéreas (Figura 2.19) o dispuestas en el medio de cultivo (Figura 2.20) por donde circula agua caliente, con la ventaja de poder trabajar a altas temperaturas (hasta 90 °C) o bajas temperaturas (entre 30 a 50 °C) en función del material utilizado, plástico o metal.



Estos sistemas modifican la temperatura del aire al calentarse por convección al contacto con los tubos y la de los objetos (suelo, planta, cubierta del invernadero, etc.) que se encuentran a su alrededor por intercambio radiactivo.

La distribución del calor es más uniforme que en los sistemas por aire al situar las tuberías cerca del cultivo y mantener unos gradientes térmicos bajos.

Desde un punto de vista físico, uno de los objetivos de la calefacción del suelo es utilizar, indirectamente, la superficie de intercambio con el aire que ofrece el suelo del invernadero, ya que esta es superior a la de los sistemas de calefacción aéreos. Desde una caldera central se aporta calor al suelo a través de tuberías enterradas, circulando el agua a temperatura inferior a 40 °C, siendo la distribución del calor uniforme y proporcionando mayor eficiencia que los sistemas por aire caliente. El elevado costo inicial y la dificultad para realizar labores en el suelo (al ir enterradas las tuberías a menos de 50 cm) han limitado el desarrollo de estos sistemas (López *et al.*, 2000).



Figura 2.19. Tubería aérea de conducción de agua caliente para generar calor



Figura 2.20. Sistema de calefacción por agua caliente a través de tubería en el piso



La utilización de las tuberías metálicas aéreas permite la incorporación de carros para prácticas culturales y aplicación de productos fitosanitarios, encaminados hacia una mayor eficiencia en el trabajo (López *et al.*, 2000).

Pantallas térmicas. Se puede definir una pantalla como un elemento que, extendido a modo de cubierta sobre los cultivos, tiene como principal función ser capaz de variar el balance radiactivo tanto desde el punto de vista fotosintético como calorífico (Shany, 2007). El uso de pantallas térmicas busca el calor almacenado durante el día en las plantas y el suelo para que no se pierda en la noche (Figura 2.21). Así, las pantallas térmicas se pueden emplear para distintos fines:

a) Protección exterior contra:

- El exceso de radiación con acción directa (UV) sobre las plantas y quemaduras.
- El exceso de temperatura (rojo, IR cercano).
- Secundariamente contra granizo, viento, pájaros (Shany, 2007; www.infoagro.com, 2003b; Cooman y Ubaque, 2006).

b) Protección interior:

- Protección térmica y reduce los gastos de energía requeridos para la calefacción.
- Secundariamente controla la humedad ambiental y la condensación.



Figura 2.21. Pantalla térmica

El efecto de las pantallas, como en el de la doble pared, se basa en la reducción de los intercambios radiantes y los de conducción-convección, pero también se alteran los intercambios de calor sensible y latente entre las plantas, el suelo, el aire, la estructura y la evapotranspiración.



Los efectos sobre los intercambios radiantes dependen de las características de transmisividad, emisividad y reflectividad de la pantalla para la radiación infrarroja larga. Si la transmisividad y emisividad son pequeñas, como es el caso de las pantallas metalizadas y con tratamientos especiales, se puede obtener gran reducción (60%) de pérdidas radiantes. Si la transmisividad o la emisividad son grandes, se obtiene una reducción pequeña de las pérdidas radiantes. Los efectos sobre los intercambios por conducción y convección dependen de la permeabilidad al aire (Shany, 2007).

Efectos de las pantallas

Los efectos de las pantallas térmicas se pueden resumir así:

- Aumento de la temperatura del aire de 1 a 2 °C.
- Aumento de la temperatura de la hoja, debido a que es mayor la temperatura superficial de la pantalla que la del material de cubierta.
- Aumento de la humedad del aire (10% - 15%). Riesgo de condensación por encima de la pantalla.
- Reducción de la temperatura de la cubierta exterior, que produce descenso de pérdidas por convección con el aire libre y menor sensibilidad térmica del invernadero al viento.

Propiedades exigibles a una pantalla

- Baja transmitancia de la radiación IR.
- Alta reflexión al IR.
- Mínima convección hacia arriba.

Propiedades convenientes

- Transparencia.
- Flexibilidad.
- Reflexión de la luz.
- Resistencia mecánica.
- Transmisión de la humedad.
- Duración frente al efecto climático.

Hay dos grupos de materiales: láminas de plástico y fibras textiles o acrílicas.

Propiedades de las láminas de plástico

- Resistencia al agua.
- No dejan pasar la humedad.
- Elevan la humedad del aire interno.
- Existe el riesgo de condensación sobre la cara interna de la pantalla y en la parte alta del cultivo.



- Alta transmitancia a la radiación IR (excepto las láminas metalizadas).
- No son utilizables para sombreado (excepto la lámina blanca).
- La lámina transparente puede permanecer extendida durante el día.
- Son baratas.
- Deben renovarse con frecuencia.
- Pueden metalizarse.

Propiedades de las pantallas de fibras y tejidos

- No resisten al agua.
- Dejan pasar la humedad.
- Elevan poco la humedad del aire.
- Tienen poco riesgo de condensación sobre ellas o el cultivo.
- Tienen baja transmitancia.
- Son útiles para sombreado.
- Deben plegarse durante el día.
- Son costosas.
- Son más duraderas.
- Son difíciles de metalizar.

Las pantallas pueden ahorrar entre un 15% y un 35% de gasto en energía; sin embargo, la pérdida de luz que provocan es superior a un 5%, y esto en condiciones de poca luz puede repercutir con un 5% o más de reducción del crecimiento. La rentabilidad de la inversión aumenta cuando puede usarse también en tiempo caluroso como material de sombreado (Martínez, 2001).

Tipos de pantallas térmicas

Existen varios tipos de pantallas térmicas (Valera, 2003; Cooman y Ubaque, 2006):

Pantalla térmica hermética. Está destinada fundamentalmente a reducir la pérdida de calor en el invernadero. El ahorro de energía durante la calefacción es significativo, debido a que dentro de la pantalla existen franjas de material reflectante.

Pantalla térmica de fibras de aluminio para el ahorro de energía dentro del invernadero en invierno. Su principal función es la conservación de calor dentro del invernadero. En un sistema de calefacción por medio de agua cuanto mayor sea el nivel de sombreado más elevada será la efectividad de conservación del calor por parte de la pantalla. En la parte inferior de la pantalla no se produce condensación, ya que la placa respira.



Pantalla sombreadora para reducir la carga de calor en el invernadero durante el verano. Cuando la radiación solar es intensa, la pantalla impide que la radiación directa dañe las plantas e impide que el suelo y objetos de colores oscuros acumulen energía calorífica. Como consecuencia de ello, la temperatura dentro del invernadero desciende y la humedad relativa aumenta; por ende, la combinación de estos factores mejora las condiciones microclimáticas dentro del invernadero.

En invernaderos con aberturas en el techo, esta pantalla permite que el aire caliente que sube desde el entorno de las plantas salga al exterior. En un invernadero que posee sistema de aspersión o lecho húmedo para aumentar la humedad el aire caliente pasa a través de la pantalla y por debajo de esta corre aire húmedo y fresco hacia las plantas.

Penetración de luz difusa. Las franjas transparentes de la pantalla dejan pasar la luz solar directa, en tanto que las franjas brillantes devuelven la luz que se refleja en ellas desde el interior del invernadero hacia las plantas. Por ejemplo, una pantalla 60% hermética permite pasar un 40% de la luz directa pero solo el 50% de la luz difusa, la cual queda disponible para el proceso de fotosíntesis.

Pantalla térmica abierta. Es utilizada principalmente para la reducción de carga calórica dentro de los invernaderos.

Pantalla térmica para el ahorro de energía durante el verano. La pantalla abierta detiene la radiación infrarroja y la devuelve hacia las plantas, conservando así el calor que necesitan. La efectividad de la pantalla es mayor mediante un sistema de calefacción por medio de agua que por aire. No hay ingreso ni difusión de enfermedades micóticas en las hojas, ya que no hay condensación por debajo de la pantalla. Se puede dejar toda la noche sin crear excesos de humedad (Valera, 2003).



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bakker, J. C.; Bot, G. P. A.; Challa, H. y Van De Braak, N. J. (1995). *Greenhouse Climate Control an integrated approach*. Wageningen. 275 p.
- Caldari, J. P. (2007). *Manejo de la luz en los invernaderos, los beneficios de luz de calidad en el cultivo de hortalizas*. Brasil: Ciba Especialidades Químicas Ltda. I Simposio Internacional de Invernaderos (México). 5 p. En: http://www.ciba.com/pf/docMDMS.asp?targetlibrary=CHBS_PA_MAD&docnumber=8758.
- Castilla, N. (1998). *Condiciones ambientales en invernaderos no climatizados*. En: *Tecnología de invernaderos. Curso superior de especialización*. España: Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. Fiapa. Caja Rural de Almería. P. 163-175.
- Castilla, N. (2001). *La radiación solar en invernadero en la costa mediterránea española. Incorporación de Tecnología al Invernadero Mediterráneo*. Almería. 68 p.
- Cooman, A y Ubaque, H. (2006). *Evaluación del efecto de pantallas térmicas sobre la temperatura mínima del invernadero*. Bogotá, Colombia: Universidad Jorge Tadeo Lozano, Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales.
- Ferrato, J. A. y Panelo, M. S. (2003). *Climatización de invernaderos*. Revista IDIA XXI. Año II, No. 14. Edición INTA. P. 160-163.
- Gómez, C.M. *Presentación Introducción al control de clima en invernaderos*. En: <http://www.fundacioncajamar.es/estacion/agrdatos/Seminarios/20081029/PresentacionControlClimatico.pdf>.
- Jaramillo, N.J.; Rodríguez, V.; Guzmán, M.; Zapata, M. y Rengifo, T. (2007). *Manual Técnico BPA en la producción de tomate bajo condiciones protegidas*. Colombia: Corpoica – FAO. MANA (1 ed.). 314 p.
- López, J.C.; Lorenzo, P.; Castilla, N.; Pérez, P.J.; Montero, J.I.; Baeza, E.; Antón A.; Fernández M. D. Baille, A. y González, R.M. (2001). *Incorporación de Tecnología al Invernadero Mediterráneo*. Almería, España: Estación Experimental Las Palmerillas de Cajamar. 68 p.
- López, J.C.; Lorenzo, P.; Medrano, Sánchez-Guerrero, M.C.; Pérez, J.; Puerto, H.M. y Arco, M. (2000). *Calefacción de invernaderos en el sudeste español (resultados experimentales para cultivos de pepino y judía)*. Edita: Caja Rural de Almería. 54 p.
- López, J. C. (2000). *Sistemas de calefacción*. En: *Calefacción de invernaderos en el sudeste español (resultados experimentales para cultivos de pepino y judía)*. Edita: Caja Rural de Almería. 54 p.
- Lorenzo, M. P. (2001). *Influencia de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de los cultivos*. En: *Calefacción de invernaderos en el sudeste español (resultados experimentales para cultivos de pepino y judía)*. Edita: Caja Rural de Almería. 54 p.
- Lorenzo, M. P. (2001). *Enriquecimiento carbónico. Incorporación de Tecnología al Invernadero Mediterráneo*. Almería. 68 p.



- Martínez, P. F. (2001). *Control Climático en Cultivo Protegido. Curso de Formación de Formadores en Horticultura Protegida y Semiprotegida*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: Agencia Española de Cooperación Internacional. 37 p.
- Pérez R., Hernando y De Paul C., Cortés. (2007). *Simulación y control de la temperatura dentro de un invernadero*. Bogotá D.C. Trabajo de Grado Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería y Automatización Electrónica. 86 p.
- Shany, Meir. (2007). *Tecnología de producción bajo cobertura*. Israel: Ministerio de relaciones exteriores. Centro de Cooperación internacional. Mashav. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Centro de Cooperación Internacional para el Desarrollo Agrícola. Cinadco. 69 p.
- Valera, D. L. (2003). *Control climático de invernaderos*. España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería. 615 p.
- Zeidan, O. (2005). *Tomato production under protected conditions*. Israel. Mas-hav, Cinadco, Ministry of Agriculture and Rural Development Extension Service. 99 p.
- URL http://www.abcagro.com/industria_auxiliar/control_climatico_2.asp#5.2.%20VENTILACIÓN
- URL http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico2.htm.

