Sistemas pasivos de calefacción en invernaderos mediterráneos

ceiA3
campus de excelencia internacional
agroalimentario

Sistemas pasivos de calefacción en invernaderos mediterráneos.

© CEIA3

© Los autores

I.S.B.N. 978-84-09-39145-5

Sistemas pasivos de calefacción en invernaderos mediterráneos.

Editores

Santiago Bonachela Castaño
Joaquín Hernández Rodríguez
Juan Carlos López Hernández
Pilar Lorenzo Mínguez
Juan José Magán Cañadas

Sistemas pasivos de calefacción en invernaderos mediterráneos.

Autores

Joaquín Hernández Rodríguez
Juan Carlos López Hernández
Santiago Bonachela Castaño
Universidad de Almería

Evangelina Medrano Cortés
María Cruz Sánchez-Guerrero Cantó
María Rosa Granados García
Pablo Fernández del Olmo
Pilar Lorenzo Mínguez
Rafael Reyes Requena
Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera

Josefa López Marín
Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Medioambiental

Juan José Magán Cañadas
Fundación CAJAMAR

Gervasio Tapia Pérez
Antonio Gil Soria
SAT Costa de Níjar

Francisco José Salvador Sola
Hortalan med

Esteban José Baeza Romero
Future Farms

Marisa Rubio Fernández
Murgiverde

Yolanda Vargas Valverde
CABASC SCA-Unica Group

Agradecimientos

Los autores quieren reconocer y agradecer la labor de los agricultores y técnicos de campo, que han sido los que han desarrollado, adaptado y mejorado los sistemas pasivos de calefacción descritos en este libro y que son usados en muchos invernaderos del litoral mediterráneo español.

También a los investigadores que han participado en los estudios previos sobre estos sistemas pasivos y que se han utilizado como base para elaborar este trabajo. Gracias a Alain Baille, Nicolás Castilla, Ignacio Escobar, Juan Ignacio Montero, Jerónimo Pérez-Parra y a todos los que han contribuido a caracterizar y extender estas técnicas.

A las instituciones, organismos y empresas que han hecho posible estos estudios, en particular a IFAPA, UAL y la Fundación CAJAMAR. Una gran parte de la información y resultados presentados en este trabajo han sido financiados por CICYT (AGF-96-2521-C03-03), por los ministerios de Ciencia e Innovación (AGL2007-64143/AGR), de Economía y Competitividad e INIA (RTA2012-00039-C02-02), de Ciencia, Innovación y Universidades (Agencia estatal de Investigación) e INIA (RTA2017- 00028-C02-02), así como por IFAPA (PP.AVA.AVA201301.8 y PP.TRA.TRA201600.9) y con la colaboración de los Fondos FEDER.

Por último, agradecer al CEIA3 su apoyo en la publicación de este libro dentro del proyecto Singular AgroMIS.

Los autores

Prólogo

Un buen libro es un buen amigo, y estoy seguro de que el lector interesado en la horticultura intensiva encontrará en este libro un amigo excelente. Tendrá en sus manos un volumen dedicado a la mejora del invernadero pasivo, particularmente en lo que se refiere a su clima nocturno, entendiéndose por invernadero pasivo aquel que se adapta al entorno y aprovecha los recursos naturales, para así tener buenas condiciones de cultivo con el uso mínimo de energía externa.

En un contexto de grave preocupación mundial por el calentamiento global, conviene recordar el contraste entre el invernadero pasivo y el activo: éste es muy tecnificado, logra producciones estables y muy elevadas, está mecanizado, y es muy eficaz en el uso de insumos como agua y nutrientes. Es una excelente "máquina productiva", que logra vencer las adversidades climáticas en los países fríos donde suele ubicarse a base de inversiones elevadas y alto consumo de energía. A modo de ejemplo, los Países Bajos logran rendimientos anuales de tomate en el rango de 60-70 kg m^{-2} y año (incluso más en algunos casos), pero el consumo de calefacción es del orden de 30 m^3 de gas por m^2, y ello a pesar del enorme esfuerzo de ahorro de energía de los horticultores neerlandeses.

El invernadero pasivo, por el contrario, es sencillo de construcción, usa tecnología blanda, es comparativamente barato, y está adaptado a la benignidad del clima en donde se ubica. Cuenta con ventilación natural y buena transmisión de luz, si está bien diseñado, que no siempre es así. Mas el clima es subóptimo, y las producciones no son las mismas del invernadero activo. Se han reportado valores medios de 16-17 kg m^{-2} en ciclo largo de tomate en Almería. No tiene calefacción, por lo que, comparando el kilo de tomate producido, empaquetado y transportado desde Almería a los mercados de Alemania, la emisión de gases de efecto invernadero del kilo de tomate almeriense es del orden de 2,5 veces menor que la del producido en Holanda (valores calculados a partir de los resultados del proyecto europeo EUPHOROS, 2012). En la categoría de impacto ambiental del calentamiento global, las ventajas del invernadero pasivo frente al activo son evidentes.

¿Y cómo se puede mejorar la productividad y la eficacia en el uso de insumos del invernadero pasivo sin separarnos de la idea matriz del uso blando de tecnología? Dejando a un lado los aspectos agronómicos, genéticos y fitosanitarios, que no son objeto de este libro, en cuanto a la tecnología del invernadero hay tres líneas principales de avance: el uso óptimo de la luz natural, la reducción de excesos térmicos, y el aumento de las temperaturas nocturnas en periodos fríos. De las dos primeras líneas de avance, se ha investigado mucho y

publicado mucho en forma de tesis doctorales, revistas científicas y divulgativas. Por desgracia, no siempre se han llevado a la práctica los resultados positivos de estos trabajos, y las innovaciones tecnológicas llegan con lentitud al sector productivo.

La tercera línea de mejora, el aumento de las temperaturas nocturnas en periodos fríos, ha recibido mucha menos atención, y es precisamente el objetivo de este libro, lo que lo hace particularmente valioso. La Introducción señala con agudeza el problema de las temperaturas mínimas subóptimas de los invernaderos del litoral mediterráneo, que reducen el crecimiento de los cultivos, generan condensación y exceso de humedad en hojas y frutos, y pueden acarrear pérdidas notables de producción y calidad.

El libro es un compendio de las técnicas de calefacción pasiva de interés para los invernaderos de clima mediterráneo. Se analizan seis técnicas: materiales de cubierta, acolchados, dobles techos, pantallas térmicas, mangas de agua y "tunelillos", nombre popular con el que se conoce el pequeño túnel que cubre las hileras de plantas en las primeras fases de cultivo. El lector encontrará unos capítulos más científico-técnicos y otros más divulgativos, porque los autores pertenecen a la academia o al mundo productivo y su experiencia profesional se refleja en su escritura. Sin ser exhaustivo, el libro está muy bien documentado con abundantes referencias bibliográficas.

La estructura de cada capítulo es similar, pues consta de una introducción, la descripción y usos de cada técnica, la respuesta del cultivo (aspecto muy a destacar porque no es fácil encontrar y conjuntar este tipo de información), las posibles mejoras de cada sistema y las conclusiones de cada uno de ellos. Esta ordenación hace que el libro sea didáctico, como también son didácticas las fotografías editadas con texto, marcando los aspectos más interesantes que, sin el texto, podrían escaparse al observador menos experto. Las gráficas abundantes, las numerosas fotografías y tablas de resultados hacen que la lectura sea amena y la comprensión del texto sea fácil.

Enhorabuena a los autores por este documento, a la vez sencillo y ambicioso.

Y ya les dejo el libro en sus manos, con mis deseos de que los lectores, en particular los técnicos hortícolas, consultores y estudiantes especializados de agronomía, disfruten de este excelente libro amigo.

Juan Ignacio Montero.
Exdirector de Investigación de Tecnología Hortícola.

Agradecimientos i
Prólogo ii
Índice iv

Introducción 1
Bibliografía 7
Materiales de cubierta 9
1. Tipos y usos de materiales plásticos de cubierta para invernaderos 10
2. Plásticos térmicos 11
2.1. Efecto sobre las pérdidas de energía y la temperatura 12
3. Plásticos antigoteo 14
3.1. Efecto sobre la radiación solar 16
3.2. Efecto de la humedad del aire y la caída de agua condensada sobre el cultivo 18
3.3. Recogida del agua condensada en los invernaderos 20
4. Conclusiones 21
5. Líneas futuras de trabajo 22
Bibliografía 22
Acolchados 26
1. Definición y tipos 27
2. Acolchados de grava-arena 27
2.1. Descripción y uso 27
2.2. Microclima del invernadero 30
2.2.1. Temperatura del suelo 30
2.2.2. Temperatura del aire 33
2.2.3. Radiación en el invernadero 34
2.3. Crecimiento y productividad de los cultivos 34
3. Acolchados de plástico 34
3.1. Descripción y uso 34
3.2. Acolchados de plástico negro 35
3.2.1. Microclima del invernadero 36
3.2.2. Crecimiento y productividad de los cultivos 41
3.3. Acolchados de plástico blanco 42
3.3.1. Microclima del invernadero 42
3.3.2. Crecimiento y productividad de los cultivos 45
4. Mejoras y necesidades futuras 47
5. Conclusiones 50
Bibliografía 51
Dobles techos 53
1. Descripción y materiales 54
2. Tipos y usos 57

Prólogo

Un buen libro es un buen amigo, y estoy seguro de que el lector interesado en la horticultura intensiva encontrará en este libro un amigo excelente. Tendrá en sus manos un volumen dedicado a la mejora del invernadero pasivo, particularmente en lo que se refiere a su clima nocturno, entendiéndose por invernadero pasivo aquel que se adapta al entorno y aprovecha los recursos naturales, para así tener buenas condiciones de cultivo con el uso mínimo de energía externa.

En un contexto de grave preocupación mundial por el calentamiento global, conviene recordar el contraste entre el invernadero pasivo y el activo: éste es muy tecnificado, logra producciones estables y muy elevadas, está mecanizado, y es muy eficaz en el uso de insumos como agua y nutrientes. Es una excelente "máquina productiva", que logra vencer las adversidades climáticas en los países fríos donde suele ubicarse a base de inversiones elevadas y alto consumo de energía. A modo de ejemplo, los Países Bajos logran rendimientos anuales de tomate en el rango de 60-70 kg m^{-2} y año (incluso más en algunos casos), pero el consumo de calefacción es del orden de 30 m^3 de gas por m^2, y ello a pesar del enorme esfuerzo de ahorro de energía de los horticultores neerlandeses.

El invernadero pasivo, por el contrario, es sencillo de construcción, usa tecnología blanda, es comparativamente barato, y está adaptado a la benignidad del clima en donde se ubica. Cuenta con ventilación natural y buena transmisión de luz, si está bien diseñado, que no siempre es así. Mas el clima es subóptimo, y las producciones no son las mismas del invernadero activo. Se han reportado valores medios de 16-17 kg m^{-2} en ciclo largo de tomate en Almería. No tiene calefacción, por lo que, comparando el kilo de tomate producido, empaquetado y transportado desde Almería a los mercados de Alemania, la emisión de gases de efecto invernadero del kilo de tomate almeriense es del orden de 2,5 veces menor que la del producido en Holanda (valores calculados a partir de los resultados del proyecto europeo EUPHOROS, 2012). En la categoría de impacto ambiental del calentamiento global, las ventajas del invernadero pasivo frente al activo son evidentes.

¿Y cómo se puede mejorar la productividad y la eficacia en el uso de insumos del invernadero pasivo sin separarnos de la idea matriz del uso blando de tecnología? Dejando a un lado los aspectos agronómicos, genéticos y fitosanitarios, que no son objeto de este libro, en cuanto a la tecnología del invernadero hay tres líneas principales de avance: el uso óptimo de la luz natural, la reducción de excesos térmicos, y el aumento de las temperaturas nocturnas en periodos fríos. De las dos primeras líneas de avance, se ha investigado mucho y

García, C., Céspedes, A.J, Lorenzo, P., Pérez-Parra, J.J., Escudero, M.C., Medrano, E., Baeza, E., López, J.C., Magán, J.J., Fernández, M.D., Parra, S., Gázquez, J.C., García, R., Pérez, C. (2016). El sistema de producción hortícola de la provincia de Almería. M.C. García, A.J. Céspedes, J.J. Pérez-Parra, P. Lorenzo (eds.). IFAPA. 180 pp.

Graham, D., Patterson, B.R. (1982). Responses of plants to low, nonfreezing temperatures: proteins, metabolism, and acclimation. Annual Review of Plant Physiology 33, 347–372.

Hernández, J., Bonachela, S., Granados, M.R., López, J.C., Magán, J.J., Montero, J.I. (2017). Microclimate and agronomical effects of internal impermeable screens in an unheated Mediterranean greenhouse. Biosystems Engineering 163, 66–77.

López, J.C. (2003). Sistemas de calefacción en invernaderos cultivados de judía en el litoral mediterráneo. Tesis doctoral. Universidad de Almería, España.

López, J.C., Baille, A., Bonachela, S., Pérez-Parra, J.J., 2008. Analysis and prediction of greenhouse green bean (Phaseolus vulgaris L.) production in a Mediterranean climate. Biosystems Engineering 100, 86–95.

Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Soriano, T., Castilla, N. (2005). Responses of cucumbers to mulching in an unheated plastic greenhouse. Journal of Horticulture Science and Technology 80, 11–17.

Montero, J.I., Castilla, N., Gutiérrez de Ravé, E., Bretones, F. (1985). Climate under plastic in the Almería area. Acta Horticulturae 170, 227–234.

Nisen, A., Grafiadellis, M., Jiménez, R., La Malfa, G., Martínez-García, P.F., Monteiro, A., Verlodt, H., Villele, O., Zabeltitz, C.H., Denis, J.C., Baudoin, W., Garnaud, J.C. (1988). Cultures protegees en climat mediterraneen. F.A.O., Rome.

Pérez-Parra, J., Baeza, E., Montero, J.I., Bailey, B. (2004). Natural ventilation of parral greenhouses. Biosystems Engineering 87, 355–366.

Van der Ploed, A., Heuvelink, E. (2005). Influence of sub-optimal temperatures on tomato growth and yield. Journal of Horticultural Science & Biotechnology 80(6), 652–659.

Zhang, C., Li, X., Yan, H., Ullah, I., Zuo, Z., Li, L., Yu, J. (2020). Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality 645 of greenhouse tomato. Agricultural Water Management 241, 106263.

Materiales de Cubierta

Juan Carlos López[1], Santiago Bonachela[1], María Rosa Granados[2]

[1]Universidad de Almería

[2]IFAPA “La Mojonera”

1. Tipos y usos de materiales plásticos de cubierta para invernaderos

En los periodos fríos se producen condiciones climáticas limitantes para el desarrollo de los cultivos donde coinciden situaciones de baja radiación solar, baja temperatura y elevada humedad. El material de cubierta afecta al microclima del invernadero al modificar la cantidad y calidad de la radiación de onda corta (0,2-3μm) y onda larga (3-100 μm) que entra y sale del mismo, lo que influye directamente en el balance de energía y, consecuentemente, en la respuesta de los cultivos. Además, el desarrollo, el crecimiento y la productividad de los cultivos están directamente influenciados por la radiación solar que se transmite a través de la cubierta, sobre todo, por la fotosintéticamente activa (PAR, 0,4-0,7 μm). Reducciones de transmisividad del invernadero a la PAR pueden afectar negativamente al crecimiento y productividad de los cultivos en los periodos de invierno cuando la radiación solar puede ser limitante en los invernaderos mediterráneos (Soriano y col., 2004). En general, el material de cubierta de invernadero debe transmitir la máxima cantidad de radiación PAR para maximizar la fotosíntesis y la mínima cantidad de radiación de onda larga para reducir las pérdidas de energía nocturnas.

Los plásticos flexibles son los materiales más utilizados como cubierta de invernadero a nivel mundial y en particular en áreas cálidas como la cuenca mediterránea (Castilla, 2005; von Zabeltitz, 2011; van Rijswick, 2018). Su expansión frente a otros materiales como el vidrio se debe, entre otros factores, a su: menor coste, menor peso, uso de estructuras de invernadero más livianas y baratas, fácil transporte y manejo, y adaptación a cualquier tipo de estructura y geometría de invernadero.

El material plástico para cubierta de invernadero está compuesto, principalmente, por polímeros y aditivos. Los polímeros aportan propiedades estructurales como la resistencia mecánica (tracción, fluencia, impacto o rasgado) y los aditivos aportan cualidades al material (durabilidad, selección de longitud de onda, etc.). El polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), el copolímero de etileno y acetato de vinilo (EVA) y el copolímero de etileno y acrilato de butilo (EBA) son los polímeros más empleados en horticultura (López y col., 2006). Las láminas plásticas se fabrican mediante extrusión y soplado, siendo habitual encontrar en el mercado láminas monocapa (formada por un polímero) y multicapa (un polímero igual o diferente en cada capa). Los plásticos multicapas posibilitan que cada capa se pueda aditivar de manera diferente aumentando las prestaciones del plástico. En la actualidad, la mayoría de los materiales plásticos flexibles usados como cubierta de invernaderos de Almería son multicapa, siendo habitual los tricapa (García y col., 2016), formados, fundamentalmente, por combinaciones de LDPE, LLDPE, EVA y EBA, aunque también se pueden encontrar en el mercado láminas de 5 y hasta 7 capas.

Los aditivos son productos químicos añadidos en pequeñas cantidades, unos para mejorar el proceso de fabricación del plástico (antioxidantes, deslizantes y antibloqueo) y otros para mejorar la funcionalidad del plástico

(fotoestabilizadores, fotoselectivos, antigoteo, etc.). Los plásticos se formulan para poder mantener sus propiedades durante su vida útil, siendo la radiación ultravioleta (UV) recibida procedente del sol el factor más degradante. Para retrasar el envejecimiento de los plásticos frente a la radiación UV se utilizan fotoestabilizadores como el "Nickel Quenchers", que actúan desactivando los grupos cromóforos y confieren al plástico un color amarillo verdoso. Hay otros fotoestabilizadores como los "HALS (Hindered Amine Light Stabilizers)", que actúan captando radicales libres y confieren al plástico un color incoloro (también llamado blanco). En la provincia de Almería, el 95 % de la superficie de invernaderos está cubierta con plásticos incoloros y el 5% restante con plásticos amarillos, que están en regresión (García y col., 2016). La duración de la cubierta del invernadero depende, en gran medida, de la radiación solar acumulada a lo largo del tiempo de exposición y, por tanto, de su localización geográfica. Así, un plástico diseñado para durar 2 años en Almería, en el sur de Francia puede durar más tiempo. A nivel comercial la duración de los plásticos de cubierta para invernadero se mide por campañas agrícolas o por años naturales, siendo lo más frecuente lo último. En la provincia de Almería, los plásticos más habituales para cubierta de invernadero están diseñados para una vida útil de 3 años con un espesor de 200 µm (800 galgas) y cubren el 96 % de la superficie de invernaderos de Almería, siendo el resto de 2 años con un espesor de 180 µm (720 galgas). El uso de plásticos de 4 años es anecdótico (García y col., 2016).

Los avances y desarrollos tecnológicos en los materiales plásticos de cubierta de invernadero para mejorar el microclima en periodos fríos en áreas con inviernos suaves, como el litoral mediterráneo, han estado dirigidos, sobre todo, a: i) reducir las pérdidas de energía nocturna (plásticos térmicos); ii) evitar o limitar la caída de agua procedente de la condensación de la cubierta del invernadero sobre el cultivo para reducir la proliferación de enfermedades (plásticos antigoteo); y iii) aumentar la transmisividad del invernadero a la radiación solar.

2. Plásticos térmicos

La radiación infrarroja (IR) es la radiación electromagnética comprendida entre 0,7 y 100 μm e integra la IR cercana (NIR), comprendida entre 0,7 y 1,4 μm y presente en la radiación solar, la IR media (MIR), comprendida entre 1,4 y 3,0 μm, y la IR lejana (FIR), comprendida entre 3,0 y 100 μm (según la clasificación de la International Commission on Illumination). La superficie terrestre y los objetos que se encuentran sobre ella emiten FIR cuya intensidad y distribución espectral depende de su temperatura, situándose la mayor parte en la región FIR con un máximo a 10 μm. Los gases de la atmósfera (principalmente H_2O_{vapor}, CO_2, O_2 y O_3) absorben la mayor parte de la radiación emitida desde la tierra y la vuelven a reemitir, pero existen longitudes de onda de radiación donde apenas hay absorción y esa energía se escapa hacia el espacio. Son las denominadas 'ventanas atmosféricas', siendo la más grande la comprendida entre 8 y 14 μm, que incluye el máximo de emisión de la tierra (Díaz y col., 2001).

Entre los polímeros más utilizados para

cubierta de invernadero el polietileno es el más transparente a la FIR, mientras el EVA y EBA la absorben parcialmente. Las pérdidas de energía del invernadero se pueden reducir mejorando las propiedades radiométricas de los plásticos, disminuyendo la transmitancia y/o aumentando la reflectancia en el FIR (Nijskens y col. 1984). La industria del plástico ha desarrollado dos vías para reducir las pérdidas de FIR, mediante la incorporación de aditivos minerales o mediante la formulación de mezclas (coextrusión) con copolímeros EVA y EBA. Los plásticos térmicos son materiales diseñados para reducir las pérdidas de energía por radiación infrarroja del invernadero, principalmente, en la ventana atmosférica más grande. Un plástico para cubierta de invernadero con espesor ≥ 200 μm se considera térmico cuando su efectividad frente a la FIR es ≥ 75 %, es decir, cuando transmite menos del 25% de la FIR comprendida entre 7-13 μm (UNE-EN 13206). Es frecuente que los plásticos térmicos comerciales para cubierta de invernadero presenten una efectividad entre 75-90%, aunque se han desarrollado nuevos aditivos que permiten que los plásticos alcancen mayores niveles de efectividad (> 95%), son los denominados plásticos ultratérmicos (Espí y col., 2006).

2.1. Efecto sobre las pérdidas de energía y la temperatura

El flujo de FIR a través de la cubierta del invernadero es un proceso fundamental en el balance de energía del invernadero en los periodos fríos, cuando la mayoría de las pérdidas de energía desde la cubierta de los invernaderos son por este tipo de radiación (Garzoli y Blackwall, 1981; von Zabeltizt, 2011). Baille y col. (2006), en un invernadero tipo parral con niveles bajos y medios de calefacción en el litoral de Almería, determinaron que las pérdidas nocturnas de energía de la cubierta del invernadero ocurrieron, mayoritariamente, por FIR (98 % de las pérdidas totales de la cubierta), mientras que las pérdidas de energía del aire del invernadero ocurrieron, sobre todo, por convección (78 % de las pérdidas totales del aire).

El uso de materiales térmicos permite limitar las pérdidas de energía del invernadero (von Zabeltitz, 1992; Papadakis et al., 2000) y, en el caso de invernaderos con calefacción, disminuir el consumo de combustible al reducir las pérdidas de energía y, por consiguiente, el valor del coeficiente global de transmisión de calor del invernadero (U). El valor de U disminuye al reducir la transmisividad del material de cubierta a la FIR. Nijskens y col. (1984) determinaron para plásticos con una transmisividad a la FIR de 0,77, frente a plásticos con una transmisividad a la FIR de 0,38, un descenso del 13% en el valor de U. ASABE (2008), para un invernadero con doble plástico inflado, estimó un valor de U de 4,0 y 2,8 W m^{-2} $^{o}C^{-1}$ para un plástico estándar y otro inhibidor de la FIR, respectivamente. Garzoli y Blackwell (1981) determinaron en invernaderos tipo macrotúnel reducciones de las pérdidas de energía de más de un 6% para materiales opacos a la FIR, frente a materiales transparentes. Ensayos realizados en los Países Bajos, en invernaderos climatizados con uso intensivo de calefacción y un cultivo de tomate (Espí y col., 2006), mostraron un 8,7% menos de consumo de combustible

con un plástico de cubierta ultratérmico (95% de efectividad a la FIR) frente a un plástico térmico estándar (82% de efectividad).

A medida que aumenta la transmisividad de la cubierta a la FIR, sobre todo en las longitudes de onda entre 8 y 14 μm, aumenta la transferencia de energía por radiación desde el cultivo y suelo hacia la atmósfera, lo que suele resultar en una menor temperatura del aire y del cultivo. Estas pérdidas de radiación son importantes en las noches frías de invierno en invernaderos en áreas mediterráneas, como el litoral de Almería, donde la temperatura del aire y cultivo alcanza, con frecuencia, valores sub-óptimos e incluso por debajo de la temperatura base de los cultivos (Montero y col., 1985; López, 2008). Además de reducir la tasa de crecimiento y desarrollo del cultivo, las bajas temperaturas aumentan el riesgo y la intensidad de daños por frío al cultivo (Graham y Patterson, 1982).

En invernaderos cubiertos con plásticos no térmicos y sin calefacción durante las noches frías, con cielo despejado y poco viento, las pérdidas por radiación de la cubierta suelen ser grandes (mayores que las ganancias de calor por convección del aire exterior), lo que provoca que la temperatura de la cubierta sea claramente menor que la temperatura del aire del invernadero y del aire exterior. Ello, a su vez, puede originar que la temperatura del aire del invernadero sea menor que la temperatura del aire exterior al perder el aire del invernadero energía por convección hacia la cubierta más fría (Manera y col., 1989; Papadakis, 1989; Silva y col., 1991; Piscia y col., 2013). La ocurrencia de una temperatura del aire del invernadero inferior a la del aire exterior se denomina inversión térmica y ocurre, con frecuencia, en los invernaderos del litoral de Almería. La figura 1 muestra como la temperatura de la cubierta plástica de un invernadero con un cultivo de melón en invierno en el litoral de

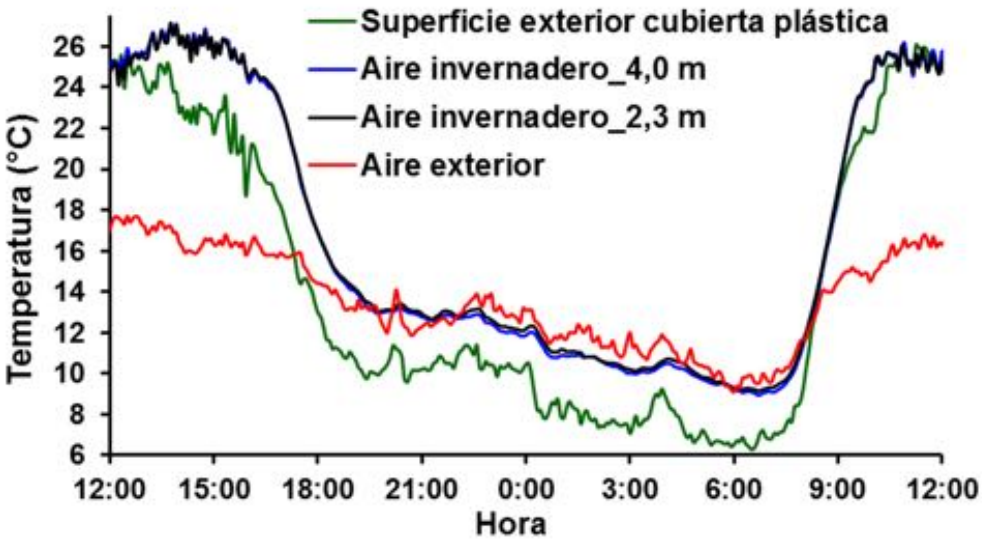


Figura 1. Dinámica diaria (desde las 12 horas del 5 hasta las 12 horas del 6 de febrero de 2010) de la temperatura del aire del invernadero medida a 2,3 y 4,0 m de altura y de la superficie externa de la cubierta de plástico de un invernadero multitúnel con un cultivo de melón, así como de la temperatura del aire exterior. El Ejido, Almería.

Almería se mantuvo durante gran parte de la noche en torno a 2ºC por debajo de la temperatura del aire exterior, mientras que la temperatura nocturna del aire del invernadero fue ligeramente inferior a la del aire exterior.

La reducción de las pérdidas de calor nocturnas mediante el uso de cubiertas plásticas térmicas puede producir un aumento de la temperatura del cultivo y del aire del invernadero, especialmente, durante las noches despejadas, y favorecer el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Espí y col., 2012; Baeza y col., 2020). Piscia y col. (2013) estudiaron, mediante balances de energía y modelos de simulación, como afecta a la temperatura del aire y cultivo reducir las pérdidas nocturnas de energía por radiación en la cubierta de invernadero. Concluyeron que el material de cubierta óptimo para limitar estas pérdidas debía tener muy baja emisividad y transmisividad a la FIR y estimaron que, en un invernadero sin calefacción en una noche con cielo despejado, el uso de un material de cubierta de alta reflectancia (emisividad de 0,025 y transmisividad a la FIR de 0,025) incrementó hasta 4 ºC la temperatura del aire y hasta 3 ºC la de la cubierta, en comparación con un material estándar (emisividad de 0,69 y transmisividad al FIR de 0,19). El valor de U fue de 12,1 y 17,4 W m^{-2} para el material de alta reflectancia y estándar, respectivamente. El aumento de la temperatura de la cubierta afectó también a la capacidad de condensación del plástico y a la humedad del aire. El invernadero con cubierta de alta reflectancia redujo la humedad relativa del aire hasta un 7%, en comparación al invernadero con material de cubierta estándar, y retrasó el inicio de la condensación más de 2 horas. Baeza y col. (2020) estudiaron en diferentes climas con modelos de simulación el efecto de las cubiertas plásticas con filtros reflectantes a la FIR frente a las cubiertas con absorción de la FIR. Concluyeron que los plásticos reflectantes presentaron mejor comportamiento en los periodos fríos al reducir las pérdidas de energía, mantener más alta la temperatura de los cultivos en invernaderos pasivos, y prevenir la condensación y, consecuentemente, la incidencia de enfermedades. También encontraron que usar cubiertas plásticas reflectantes a la FIR en periodos calurosos podría ser contraproducente por producir aumentos excesivos de la temperatura, aunque si el período de cultivo más importante es invierno y el invernadero está bien ventilado, podría justificarse su uso.

3. Plásticos antigoteo

Durante los periodos fríos en los invernaderos mediterráneos con cultivos desarrollados se produce, con frecuencia, condensación de agua en la superficie de la cubierta. Este proceso tiene lugar cuando la temperatura del material de cubierta se encuentra por debajo de la temperatura de rocío del aire cercano a la misma, dando lugar, normalmente, a la formación de gotas de agua sobre la superficie del plástico (Fotografía 1). Esta condensación suele ocurrir en el periodo comprendido entre la puesta de sol y varias horas después del amanecer, pero es más frecuente e intenso en torno al amanecer (Granados y col., 2011). La presencia de gotas de agua condensada en

Fotografía 1. Agua condensada en la cara interna del plástico en un invernadero parral en Almería.

la cubierta del invernadero puede afectar negativamente al cultivo al reducir la transmisividad del invernadero a la radiación solar (Pollet y Pieters, 2000; Sonneveld y col., 2002; Stanghellini y col., 2011), lo que puede limitar el crecimiento y desarrollo del cultivo (Soriano y col., 2004), y si las gotas de agua caen sobre el cultivo puede aumentar el riesgo y la intensidad de enfermedades fúngicas (Baptista, 2007).

El comportamiento de los distintos materiales de cubierta es diferente en cuanto a la geometría de la gota de condensación que forman, lo que afecta a la transmisividad a la radiación. Cuando la diferencia de tensión superficial entre el agua (72 dyn cm^{-1}) y el material de cubierta (PE, 31 dyn cm^{-1}; EVA, 33 dyn cm^{-1}) es grande, la condensación ocurre en forma de pequeñas gotas, mientras que cuando la diferencia es pequeña la condensación forma una lámina de agua. Para cuantificar la intensidad del efecto antigoteo de los materiales se puede medir la diferencia de tensión superficial entre el agua y la cubierta, pero no es sencillo, por lo que se suele recurrir a medir el ángulo de contacto entre la gota y el material de cubierta, que es más fácil. Materiales como el vidrio presentan un ángulo de contacto de 0º, es decir, forman una lámina de agua plana. En el lado opuesto están los materiales como el ETFE (etileno tetrafluoroetileno) con ángulos de contacto superiores a 150º, mientras que los plásticos más habituales en agricultura, como el PE, presentan ángulos de contacto cercanos a 90º (Fig. 2).

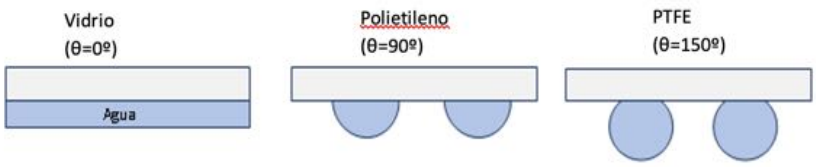


Figura 2. Ángulo de contacto (θ) entre el agua condensada y diferentes materiales de cubierta (adaptado de Díaz y col., 2001).

Para evitar la formación de gotas de agua de condensación en los materiales plásticos más habituales en la cubierta de los invernaderos (PE, EVA y EBA) se pueden incorporar aditivos antigoteo durante su proceso de fabricación. Estos aditivos incorporan surfactantes no iónicos con una parte de su molécula hidrófila y otra hidrófoba (una parte polar y otra apolar), lo que aumenta la tensión superficial del plástico y reduce la diferencia de tensión entre el material plástico y la gota de agua, dando lugar a la formación de una lámina delgada de agua (Díaz y col., 2001). Este agua puede escurrir y ser recogida si la cubierta del invernadero tiene suficiente pendiente. Los aditivos surfactantes son parcialmente solubles en agua, por lo que la propia condensación los va extrayendo del film plástico, de forma que el plástico pierde parcial o totalmente el efecto antigoteo con el tiempo (López y col., 2006). En los materiales plásticos multicapa es factible aumentar la vida útil del efecto antigoteo incorporando los aditivos surfactantes en diferentes capas del material multicapa para que haya un reservorio de aditivos, que permita la reposición continua de lo que pierde por lavado. Lo habitual en los materiales plásticos tricapas, los más usados, es incorporar los aditivos en la capa interna y central (esta última actúa como reservorio), pero no en la capa externa. Esto es importante dado que estos aditivos surfactantes fijan, fácilmente, el polvo, lo que podría reducir la transmisividad del invernadero a la radiación solar si se incorporan en la capa externa de la cubierta (Montero y col., 2013).

La utilización de materiales plásticos antigoteo, a veces, produce la formación de niebla en el aire del invernadero, especialmente al amanecer y anochecer, cuando se produce una bajada brusca de temperatura o un incremento brusco de la humedad. La niebla puede formarse porque la lámina de agua condensada en el plástico antigoteo tiene más superficie para evaporar que las gotas que se forman en un plástico estándar (Zabeltitz, 2011). Katsoulas y col. (2008) indicaron que la formación de niebla podría ser producida por la condensación y evaporación que ocurre, con frecuencia, en el plástico antigoteo. Para evitar este efecto, que puede ser negativo si se mojan los cultivos, los plásticos antigoteo incorporan habitualmente aditivos antiniebla, que producen una capa de agua condensada más delgada y fácil de retirar. Sin embargo, a veces, estos aditivos no impiden la ocurrencia de niebla, siendo necesario ventilar para eliminarla.

3.1. Efecto sobre la radiación solar

La radiación PAR es necesaria para la fotosíntesis, el crecimiento y la producción de los cultivos (McCree, 1972). En áreas templadas se han encontrado aumentos de producción próximos al 1% al aumentar un 1% la PAR incidente (Cockshull y col., 1992). La formación de agua condensada en la cubierta del invernadero puede reducir su transmisividad a la radiación solar, así como modificar la dirección de la radiación incidente sobre el cultivo. El efecto de la formación de agua condensada sobre la transmisividad depende de la geometría y tamaño de la gota (Jaffrin y Morisot, 1994; Pollet y col., 2000 y 2002a y b). La condensación de agua en forma de lámina de agua en la cubierta del invernadero apenas afecta a la

transmisividad (Gbiorczic, 2003), mientras que la formación de gotas reduce la transmisividad del invernadero a la radiación solar, al aumentar su reflexión (Pieters y col., 1997; Pollet y Pieters, 2000, 2002a y b), y aumenta el porcentaje de radiación difusa dentro del invernadero, al aumentar la dispersión de la radiación que entra (Stanghellini y col., 2011). En medidas realizadas con radiación incidente perpendicular al material, se encontró que la mayor reducción de transmisividad a la radiación solar se produce cuando los ángulos de contacto entre la gota de agua y el material están próximos a 90 º (Fig. 3) debido a que estos ángulos provocan altas reflexiones de la radiación), lo que ocurre en los plásticos más usados en agricultura, como el PE (Díaz y col., 2001).

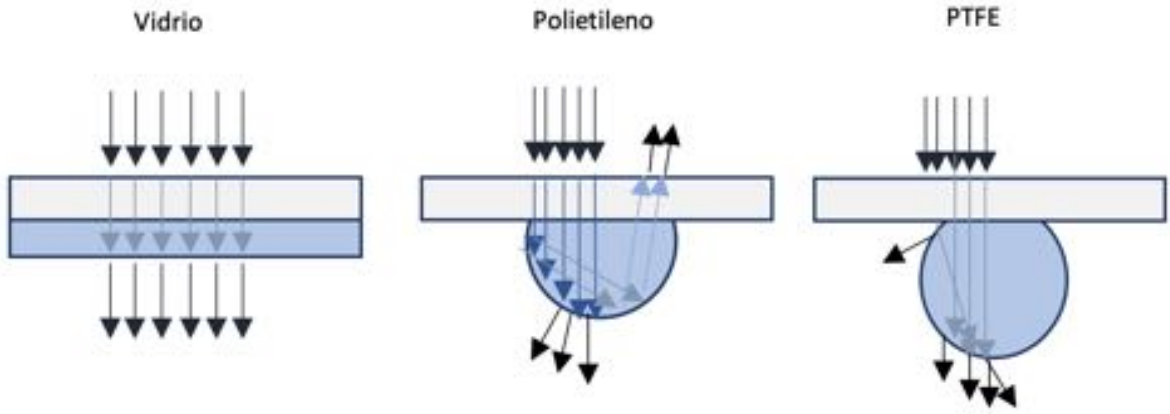


Figura 3. Comportamiento de la luz en función de la geometría de la gota de condensación y del material de cubierta (adaptado de Díaz y col., 2001).

En un invernadero con cubierta de polietileno en días despejados (mayoría de radiación solar directa), las pérdidas de transmisividad debido a la formación de gotas de agua por condensación pueden alcanzar valores de hasta un 25%, mientras que en días nublados (mayoría de radiación difusa) las pérdidas se aproximan al 10% (Pollet y col., 2000; Von Elsner y col., 2000). En un ensayo realizado en Almería (Fundación Cajamar) en un invernadero multitúnel de plástico con un cultivo de tomate, se midió la transmisividad de la cubierta del invernadero antes y después de retirar la condensación que se formó en la superficie interna de su cubierta. Se encontró que la formación de gotas de condensación originó pérdidas de transmisividad a la radiación solar de hasta un 24%, a consecuencia de las reflexiones provocadas por la presencia de gotas (Fig. 4).

En otro ensayo realizado en Almería (Fundación Cajamar) se evaluó el efecto de un plástico antigoteo, respecto a un plástico estándar, sobre el clima de un invernadero tipo túnel a pequeña escala: 10 m de acho, 24 m de longitud, 2,8 m de altura máxima en la cumbrera y una pendiente media de 30º (López de Coca, 2016). El invernadero se dividió en dos compartimentos idénticos separados mediante una cortina plástica vertical, lo que permitió disponer de dos módulos independientes, cada uno cubierto con un tipo de plástico (Fotografía 2). En el módulo con plástico antigoteo el agua

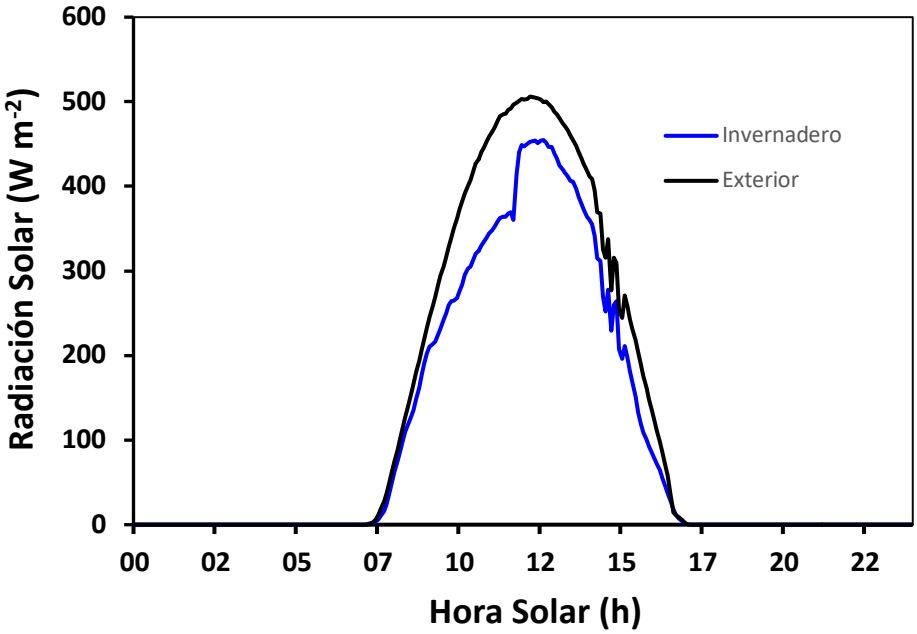


Figura 4. Radiación solar incidente (W m^{-2}) medida lo largo de un día frío (17/02/2014) dentro y fuera de un invernadero multitúnel con un cultivo de tomate en Almería (Fundación Cajamar). La limpieza de la condensación de la cara interna de la cubierta del invernadero, alrededor de las 12 hora solar, provocó un aumento de hasta un 24% en la transmisividad de la radiación solar.

Fotografía 2. Invernadero experimental para medir la condensación de agua bajo dos materiales de cubierta, uno antigoteo y otro estándar.

condensó formando una lámina que escurría debido a la pendiente de la cubierta, manteniendo el plástico seco durante gran parte del día, mientras que en el módulo con plástico estándar se formó condensación en forma de gotas, que se mantuvieron durante gran parte del día. La radiación solar en el interior del invernadero fue mayor bajo plástico antigoteo, siendo el promedio durante las horas de luz de 250 W m^{-2} y de 207 W m^{-2}, para el módulo con plástico antigoteo y estándar, respectivamente, lo que supuso un 20% de incremento.

3.2. Efecto de la humedad del aire y la caída de agua condensada sobre el cultivo

La alta humedad del aire y la caída del agua condensada sobre el cultivo favorecen la proliferación de enfermedades en los cultivos (Fotografía 3), lo que puede afectar negativamente al rendimiento, calidad y valor económico de

Fotografía 3. La presencia de agua sobre los cultivos y las humedades elevadas facilitan la aparición de enfermedades.

los mismos (Peet, 1992; Elad y col., 1996, Baptista, 2007; Katsoulas y col., 2007). Además, la alta humedad relativa y la presencia de agua sobre los frutos también afecta a las propiedades mecánicas de su cutícula, debilitándola y provocando su rotura (López-Casado y col., 2007; Domínguez y col., 2012). Se trata de un problema grave en los invernaderos mediterráneos, donde la ventilación suele ser insuficiente y los productos fitosanitarios para el control de enfermedades son limitados. En Almería, la superficie media estimada de ventilación de los invernaderos (% de área de ventanas respecto al área de suelo) es próxima al 13% (Baeza y col., 2010), valor muy por debajo del aconsejable situado entre 20 y 25%.

En invernaderos tipo túnel cultivados de pepino en Grecia, Katsoulas y col. (2008) evaluaron el efecto sobre el microclima de dos tipos de materiales plásticos para cubierta de invernadero: polietileno estándar (PE) y polietileno antigoteo con efecto antiniebla (PE_{AD+AF}). Encontraron que: i) la humedad relativa nocturna del aire en los invernaderos con PE y con PE_{AD+AF} fue similar, próxima al 80%; ii) una mayor condensación y caída de gotas sobre el cultivo de pepino bajo PE al amanecer, mientras que el cultivo bajo PE_{AD+AF} se mantuvo seco; iii) un mayor ataque de botrytis en el cultivo bajo plástico PE que en el cultivo bajo plástico PE_{AD+AF}, con 40% y 10% de hojas afectadas, respectivamente; y iv) se aplicaron la mitad de fitosanitarios al cultivo bajo plástico PE_{AD+AF} que al cultivo bajo plástico PE.

El agua condensada puede gotear, escurrir o ambas cosas a la vez, en función del ángulo de contacto con el material de cubierta y de la pendiente de la cubierta. Gbiorczyk y col. (2004) estudiaron la influencia de la pendiente de la cubierta sobre el desplazamiento del agua condensada en plásticos estándares y antigoteo. En cubiertas con plásticos estándares y pendientes pequeñas (<10º), el agua condensada permanece en el plástico hasta su caída por gravedad al aumentar de tamaño. A medida que aumenta la pendiente, el agua condensada comienza a escurrir y gotear simultáneamente, siendo necesaria una pendiente muy elevada (>45º) para que predomine el agua escurrida sobre la que gotea. En cubiertas con plásticos antigoteo se produce goteo del agua condensada cuando la pendiente del invernadero es pequeña (< 5º), comienza

a escurrir y gotear simultáneamente al incrementar la pendiente, y a partir de pendientes mayores de 10º toda el agua condensada en la cubierta escurre, facilitando su recogida y evitando el goteo sobre el cultivo.

En los invernaderos multitúnel tipo gótico (pendiente media superior a 25º) el uso de plásticos antigoteo permite que el agua condensada en la mayor parte de la cubierta plástica escurra y pueda ser retirada de la zona de cultivo. En cambio, en los invernaderos tipo parral con escasa pendiente, entre 0 y 10º (García y col., 2016), el uso de plásticos antigoteo no tiene interés al no escurrir adecuadamente el agua sobre la superficie plástica y, sobre todo, al formarse gotas en los alambres que sujetan la cubierta plástica, que terminan cayendo sobre el cultivo (Parra y col., 2004) por aumento del peso de la gota o por pequeñas vibraciones del plástico (presencia de viento o movimiento de ventanas). Es frecuente observar más goteo en un invernadero parral con material antigoteo que con plástico estándar.

3.3. Recogida del agua condensada en los invernaderos

El agua condensada en la cubierta de invernaderos con plásticos antigoteo y una adecuada pendiente, puede escurrir y ser recogida con pequeñas canaletas ubicadas en las bajantes de la cubierta del invernadero (Fotografía 4). Ello puede suponer una fuente complementaria de agua de calidad en zonas, como el litoral mediterráneo, donde este recurso es escaso y caro. La cantidad de agua condensada recuperada depende del tipo de invernadero, del material de cubierta, del cultivo y de la climatización y localización del invernadero.

En el ensayo descrito anteriormente (López de Coca, 2016), en un invernadero experimental tipo túnel a pequeña escala (10 m x 24 m con pendiente de 30º) con dos compartimentos uno con un plástico estándar y otro antigoteo, el plástico

Fotografía 4. Distintos tipos de canaletas para la recogida de agua de condensación.

antigoteo recuperó un 30% más de agua condensada que el plástico estándar.

En otros ensayos realizados durante tres campañas agrícolas consecutivas (2008/09, 2009/10 y 2010/11) se midió el agua de condensación recogida de los techos de dos invernaderos comerciales climatizados tipo Venlo en Antas (norte de la provincia de Almería), uno con cubierta de vidrio y otro con cubierta de

plástico antigoteo (Garrido-Sánchez, 2012). Estos invernaderos recogían el agua de condensación que ocurría tanto en la cara interna como externa de su cubierta, aunque la mayor parte de la condensación ocurrió en la cara interna. La cantidad de agua de condensación recogida en las distintas campañas agrícolas osciló entre 27 y 39 L m^{-2} en ambos tipos de cubiertas, siendo ligeramente superior en los módulos con cubierta de vidrio. La condensación diaria máxima fue de aproximadamente 0,4 L m^{-2} $día^{-1}$ y ocurrió en el periodo invernal, mientras que en el periodo estival prácticamente no hubo. En general, el agua condensada en la cubierta comenzó a recogerse durante la tarde, el flujo aumentó durante la noche y fue máximo a primera hora de la mañana (6-8 h solar). A continuación, el flujo disminuyó rápidamente siendo mínimo o nulo al mediodía. Estas cantidades de agua de condensación recogida representan entre el 6 y 9% del agua de riego total aplicada anualmente a una rotación de cultivos de invernadero del litoral de Almería (Fernández y col., 2012). En El Ejido, el principal municipio de invernaderos del litoral español, también se midió el agua condensada recogida de la superficie interna del techo de un invernadero climatizado de vidrio tipo Venlo durante el periodo invernal de varios ciclos de cultivo (Granados y col., 2011). La mayor parte del agua de condensación recogida se produjo durante el periodo nocturno, pero el flujo de condensación siguió siendo elevado durante la primera mitad de la mañana en el periodo más frío del ciclo. Los valores diarios (máximos de 0,15 L m^{-2} $día^{-1}$) y estacionales (10-12 L m^{-2}) de agua condensada recogida fueron claramente inferiores a los encontrados en los invernaderos tipo Venlo de Antas. Estas diferencias pueden atribuirse, sobre todo, a las menores temperaturas nocturnas del aire exterior durante el periodo frío del año en la zona de Antas, comparada con la de El Ejido, 6,5 °C y 9,9 °C, respectivamente.

En invernaderos de alta tecnología de vidrio localizados en los Países Bajos, bajo condiciones más frías, se ha estimado mediante modelos de simulación que la cubierta del invernadero permanece el 50% del tiempo parcialmente húmeda y que la cantidad de agua condensada anualmente en la cubierta es de unos 100 L m^{-2} cubierta. Estos datos han sido validados en invernaderos comerciales de vidrio (Stanghellini y col., 2011).

4. Conclusiones

Los plásticos para cubierta de invernadero pueden ser aditivados para mejorar sus cualidades para su uso en periodos fríos donde coinciden condiciones de baja radiación solar y baja temperatura y elevada humedad del aire, todos ellos limitantes para el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Los plásticos térmicos actuales permiten reducir las pérdidas de energía del invernadero y, por tanto, mejorar la temperatura del aire y del cultivo en periodos fríos. El desarrollo de plásticos comerciales con una elevada reflectancia y una baja emisividad y transmisividad a la radiación infrarroja (FIR) puede reducir aún más las pérdidas de energía.

La presencia de gotas de condensación en la cubierta plástica del invernadero provoca reducciones importantes en la transmisividad a la radiación solar. El uso de plásticos antigoteo reduce dichas

pérdidas de transmisividad frente a plásticos estándares, pero es preciso mejorar la estabilidad de los aditivos antigoteo para que permanezcan durante toda la vida útil del plástico.

En los periodos fríos el uso de materiales de cubierta antigoteo permite reducir o eliminar el goteo de agua condensada sobre los cultivos si la cubierta dispone de pendiente suficiente para que el agua pueda escurrir, pero no son adecuados en invernaderos tipo parral donde la escasa pendiente de la cubierta y la malla de alambre en contacto con el plástico impide la circulación del agua condensada, provocando su caída sobre el cultivo.

La cantidad total anual de agua condensada en la cubierta del invernadero recogida es limitada (< 15 L m^{-2}) en invernaderos localizados en la principal zona de invernaderos de Almería (Poniente). Esta cantidad puede aumentar (30-40 L m^{-2}) en invernaderos climatizados localizados en zonas más frías de la provincia de Almería, como Antas.

5. Líneas futuras de trabajo

Es necesario evaluar la eficacia de los materiales antigoteo para evitar o limitar las enfermedades de los cultivos en invernadero, cuantificando las plantas afectadas y la intensidad de la infección, la reducción de aplicaciones fitosanitarias y su coste económico, y el valor comercial de las cosechas.

Otra línea de trabajo de interés es aumentar la transmisividad del plástico de cubierta en las longitudes de onda de la radiación solar más eficaces para la fotosíntesis de las plantas, como la radiación azul y roja. Este sería el caso de los plásticos luminiscentes, que absorben radiación en las longitudes de onda menos efectivas para los cultivos y las reemiten en las más efectivas. Estos plásticos están todavía en fase de desarrollo para cubierta de invernadero dado que precisan mayor estabilización en el tiempo y mayor selectividad en las longitudes de onda seleccionadas.

Un desarrollo tecnológico de interés, evaluado con modelos de clima con buenos resultados tanto en zonas calurosas como frías, es el uso de filtros o aditivos reflectantes y modulables a la FIR (Baeza y col., 2020), de forma que el aditivo se active o desactive (refleje o transmita FIR) en función de las necesidades climáticas del invernadero, para aumentar la temperatura en periodos fríos o evitar excesos de temperatura en periodos calurosos.

Bibliografía

Baeza, E., Pérez Parra, J.J., López, J.C., Gázquez, J.C., (2010). Ventilación natural. En: Manejo del clima en invernadero mediterráneo. IFAPA.11-35.

Baeza, E., Hemming, S., Stanghellini, C. (2020). Materials with switchable radiometric properties: Could they become the perfect greenhouse cover? Biosystems Engineering 193, 157–173.

Baille, A., Lopez, J.C., Bonachela, S., Gonzalez-Real, M.M., y Montero, J.I. (2006). Night energy balance in a heated low-cost plastic greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology 137, 107–118.

Baptista, F.J.F. (2007). Modelling the climate in unheated tomato greenhouses and predicting Botrytis cinerea infection (Ph.D. thesis) Universidade de Evora, Portugal.

Castilla, N. (2005). Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Cockshull, K. E., Graves, C.J., y Cave, R. J. (1992). The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. Journal of Horticultural Science, 67, 11–24.

Díaz, T., Espí, E., Fontecha, A., Jiménez, J.C., López, J., Salmerón, A. (2001). Los filmes plásticos en la producción agrícola, Repsol YPF - Mundi-Prensa, Madrid.

Domínguez, E., Fernández Fernández, M.D., López, J.C., Pérez-Parra, J., España, L., Heredia, A., Cuartero, J. (2012). Tomato fruit continues growing while ripening, affecting cuticle properties and cracking. Physiologia Plantarum 146, 473–486.

Elad, Y., Malathrakis, N., Dik, A. (1996). Biological control of Botrytis incited diseases and powdery mildews in greenhouse crops. Crop Protection 15(3), 229–40.

Espí, E., Salmerón, A., Fontecha, A., García-Alonso, Y., Real, A.I. (2006). New Ultrathermic Films for Greenhouse Covers. Journal of Plastic Film and Sheeting, SAGE Publications 22 (1), 59–68.

Espí, E., Salmarón, A., Fontecha, A., García, Y., Real, A.I. (2012). Plastic films for agricultural applications. Journal of Plastic Film Sheeting 22, 85–102.

Fernández, M.D., Thompson, R.B., Bonachela, S., Gallardo, M., Granados, M.R., (2012). Uso de agua y programación del riego en cultivos hortícolas en invernadero. En: Innovación en estructuras productivas y manejo de cultivos en agricultura protegida Vol 3. Cuadernos de estudios Agroalimentarios. Fundación Cajamar.

García, M.C., Céspedes, A.J., Lorenzo, P., Pérez-Parra, J.J., Escudero, M.C., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Baeza, E., López, J.C., Magán, J.J., Fernández, M.D., Parra, S., Meca, D.E., Gázquez, J.C., García, R. y Pérez C. (2016). El Sistema de Producción Hortícola de la Provincia de Almería. IFAPA. 180 p.

Garrido-Sánchez, R. (2012). Condensación de agua en invernaderos tipo venlo con cubierta de vidrio y de plástico. Trabajo fin de carrera. Universidad de Almería.

Garzoli, K.V. y Blackwell, J. (1981). An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. Journal of Agricultural Engineering Research 26, 203–214.

Gbiorczyk, K. (2003). New test methods for evaluating the antifog effect of greenhouse films. Gartenbautechnische Informationen, Institut für technik in gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover, Heft 58,195 p.

Gbiorczyk, K., Sonneveld, P.J., Bot, G.P.A., von Elsner, B. (2004). The effect of roof inclination on the condensation behaviour of plastic films used as greenhouse covering materials. Acta Horticulturae 633, 127–136.

Granados, M.R, Ortega, B., Bonachela, S., Hernández, J., López, J.C., Pérez-Parra, J.J., Magán, J.J. (2011). Measurement of the Condensation. Flux in a Venlo-Type Glasshouse with a Cucumber

Crop in a Mediterranean Area. Acta Horticulturae 893, 531–538.

Graham, D., Patterson, B. D. (1982). Responses of plants to low nonfreezing temperatures: Proteins, metabolism, and acclimation. Annual Review of Plant Physiology 33(1), 347–372.

Jaffrin, A., Morisot, A. (1994). Role of structure, dirt and condensation on the light transmission of greenhouse covers. Plasticulture 101, 33–44.

Katsoulas, N., Bartzanas, T., Manolaraki, C., Kittas, C. (2007). Effects of anti-drip cover materials on microclimate and production of a hydroponic cucumber crop. Proceedings GreenSys 2007. Naples, Italy 4–6 Oct.

Katsoulas, N., Manolaraki, C.H., Kittas, C., Bartzanas, T. (2008). Effects of anti-drip cover materials on microclimate and production of a hydroponic cucumber crop. Acta Horticulturae 801, 267–274.

López-Casado, G., Matas, A.J., Domínguez, E., Cuartero, J., Heredia, A. (2007). Biomechanics of isolated tomato (Solanum lycopersicum L.) fruit cuticles: the role of the cutin matrix and polysaccharides. Journal of Experimental Botany 58, 3875–3883.

López, J.C., Pérez-Parra, J., Morales, M.A. (2006). Plásticos para la agricultura. Manual de aplicaciones y usos. CEPLA-IFAPA, 143 p.

López, J.C., Baille, A., Bonachela, S., Perez-Parra, J. (2008). Analysis and prediction of greenhouse green bean (Phaseolus vulgaris L.) production in a Mediterranean climate. Biosystems Engineering 100(1), 86–95.

López de Coca, R. (2016). Efectos de un material plástico de cubierta con propiedades anticondensantes en el microclima del invernadero. Trabajo fin de Master. Universidad de Almería.

Manera, C., Picuno, P., Scarascia Mugnozza G. (1989). Analysis of nocturnal microclimate in single skin cold greenhouse in Mediterranean countries. Acta Horticulturae 281, 47–56.

McCree, K.J. (1972). The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. Agricultural Meteorology 9, 191–216.

Montero, J.I., Castilla, N., Gutiérrez de Ravé, E., Bretones, F. (1985). Climate under plastic in the Almeria area. Acta Horticulturae 170, 227–234.

Montero, J.I., Teitel, M., Baeza, E., López, J.C, Kacira, M. (2013). Greenhouse design and covering materials. En: Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops Principles for Mediterranean climate areas. FAO Plant Production and Protection, 217. 616 p.

Nijskens, J., Deltour, J., Coutisse, S., Nisen, A. (1984). Heat transfer through covering materials of greenhouses, Agricultural and Forest Meteorology 33, 193–214.

Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mugnozza, G., Vox, G., Feuilloley, P., Stoffers, J.A. (2000). Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. Journal of Agricultural Engineering Research 77, 7–38.

Papadakis, G., Frangoudakis. A., Kyritsis, S. (1989). Theoretical and experimental investigation of thermal radiation transfer in polyethylene covered greenhouses. Journal of Agricultural Engineering Research 44, 97–111.

Parra, J. P., Baeza, E., Montero, J. I., Bailey, B. J. (2004). Natural ventilation of parral greenhouses. Biosystems Engineering 87(3), 355–366.

Peet, M.M. (1992). Fruit cracking in tomato. HortTechnology 2, 216–223.

Pieters, J.G., Deltour, J., Debruyckere, M. (1997). Light transmission through condensation on glass and polyethylene. Agricultural and Forest Meteorology 85, 51–62.

Piscia, D., Montero, J.I., Bailey, B., Muñoz, P. Olivia, A. (2013). A new optimisation methodology used to study the effect of cover properties on night-time greenhouse climate. Biosystems Engineering 116(2), 130–143.

Pollet, I.V., Pieters, J.G. (2000). Condensation and radiation transmittance of greenhouse transparent materials. Part 3: results for glass plates and plastic films. Journal of Agricultural Engineering Research 77(4), 419–428.

Pollet, I.V., Pieters, J.G. (2002a). Visible radiation transmittances of dry and condensate covered glass and plastic greenhouse cladding. Agricultural and Forest Meteorology 110(4), 285–298.

Pollet, I.V., Pieters, J.G. (2002b). Forward scattering induced by water drops on a transmissive substrate. Applied Optics 41, 5122–5129.

Silva, A.M., Miguel, A., Rosa, R. (1991). Thermal radiation inside a single span greenhouse with a thermal screen, Journal of Agricultural Engineering Research 49, 185–298.

Stanghellini, C., Bruins, M.V., Mohammadkhani, G.J., Swinkels, P.J. Sonneveld. (2011). Effect of condensation on light transmission and energy budget of seven greenhouse cover materials. International Symposium on Advanced Technologies and Management Towards Sustainable Greenhouse Ecosystems. Acta Horticulturae 952, 249–254.

Soriano, T., Montero, J.I., Sánches-Guerrero, M.C., Medrano, E., Antón, A., Hernández, J., Morales, M.I., Castilla, N. (2004). A study of solar radiation transmission in asymmetrical multi-span greenhouses using scale models and simulation models. Biosystems Engineering 88(2), 243–253.

Van Rijswick, C. (2018). World vegetables map. Food & Agribusiness. Retrieved from Rabobank Website https://research.rabobank.com/far/en/sectors/regional-food-agri/world_vegetable_map_2018.html.

Von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., Von Zabeltitz, Chr., Gratraud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R. (2000). Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries, Part I: Design Requirements. Journal of Agricultural Engineering Research 75, 1–16.

Von Zabeltitz, C. (1992). Energy-efficient greenhouse designs for Mediterranean countries. Plasticulture 92, 6–16.

Von Zabeltitz, C. (2011). Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates : Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control by Christian von Zabeltitz. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 363 p

Acolchados

Santiago Bonachela[1], Juan Carlos López[1], Joaquín Hernández[1], Pilar Lorenzo[2], María Rosa Granados[2], Francisco José Salvador Sola[3]

[1]Universidad de Almería

[2]IFAPA “La Mojonera”

[3]Hortalan Med S.L.

1. Definición y tipos

Los acolchados son cubiertas naturales o artificiales que colocadas sobre la superficie del suelo actúan como barreras a la transferencia de energía y/o masa modificando el balance de energía en la superficie del suelo y el almacenamiento de ésta en el suelo (Rosenberg y col., 1983). En horticultura los acolchados se usan ampliamente para mejorar el ambiente que rodea al cultivo: reducir la evaporación y aumentar la retención de agua del suelo; aumentar o disminuir la temperatura del suelo; reducir la infestación de malas hierbas; reducir la erosión del suelo; mejorar la calidad del producto cosechable; etc. Hay numerosos tipos de materiales utilizados como acolchados, que pueden dividirse en acolchados orgánicos (paja, corteza de pino, restos de cultivos, papel, etc.), inorgánicos (films plásticos, geotextiles, grava, arena, etc.) y sus mezclas. En los cultivos en invernaderos, al tratarse de cultivos en recintos semi-cerrados donde hay múltiples intercambios de energía entre el suelo, el aire, el cultivo y la cubierta del invernadero (Aubinet y col., 1989), el uso de acolchados puede modificar sustancialmente el clima del invernadero y, consecuentemente, la respuesta de los cultivos. Las características físicas y, particularmente, las ópticas del acolchado, y su grado de contacto con el suelo suelen ser las que más afectan al reparto de la energía neta disponible en las interfases aire–acolchado y acolchado–suelo, ya que afecta a los procesos de transferencia de energía (radiación, convección, conducción, evaporación y condensación) que ocurren en estas interfases. En los cultivos hortícolas en invernadero del litoral Mediterráneo se utilizan fundamentalmente dos tipos de acolchados: mezclas de grava-arena y láminas plásticas.

2. Acolchados de grava-arena

2.1. Descripción y uso

El uso de grava, arena o mezclas de ambos materiales como acolchado es una técnica de cultivo tradicional usada en distintas zonas semiáridas del mundo, como el nordeste de China (Li, 2003), con el objetivo principal de mejorar la eficiencia del uso del agua y aumentar la temperatura del suelo. En los cultivos hortícolas en invernadero del litoral Mediterráneo andaluz el uso de acolchados de grava-arena es una práctica común. En la provincia de Almería, el 77% de la superficie de invernaderos (campaña 2012/13) tiene suelos con una capa superficial o acolchado de grava-arena, denominados localmente enarenados (García y col., 2016). Estos suelos están normalmente formados (Fig. 1) por una capa de suelo con buenas características agronómicas de 0,2 a 0,4 m de espesor y textura franca o más fina (aportada cuando el suelo original presenta inadecuadas características agronómicas), una capa de unos 0,02 m de estiércol (que se mineraliza y desaparece con el tiempo) y, por encima una capa de unos 0,1 m de grava y arena (acolchado). Estos suelos, que se utilizaron primero en los cultivos hortícolas al aire libre de la zona, se extendieron rápidamente a los cultivos en invernadero ya que aportaban numerosas ventajas (Bonachela y col., 2020): mejoraban la eficiencia del uso del agua reduciendo la evaporación del suelo; mitigaban los problemas de salinidad del suelo y del agua reduciendo la

Figura 1. Esquema de un típico suelo enarenado de los invernaderos del litoral mediterráneo andaluz (adaptada de Cadahía, 1988)

acumulación de sales dentro del bulbo húmedo; reducían los problemas de infestación de malas hierbas; y disminuían la compactación del suelo producida por trabajadores y maquinaria. A pesar de estas ventajas, el uso de acolchados de grava-arena en los invernaderos mediterráneos ha sido, en general, poco estudiado, por lo que no se conocen bien sus características ni sus capacidades potenciales. Además, en los últimos años se está cuestionando su uso debido, sobre todo, a que el acolchado de grava-arena dificulta la incorporación de restos de cultivos y materia orgánica al suelo, una práctica sostenible usada, sobre todo, en los cultivos ecológicos en invernadero.

La capa superficial o acolchado de grava-arena de los suelos enarenados suele tener un espesor en torno a 0,1 m (Bretones, 1999) y una granulometría diversa. La información sobre la granulometría de esta capa es escasa y la granulometría ideal recomendable para los cultivos hortícolas en invernadero no está bien definida. Hay opiniones y recomendaciones sobre la granulometría ideal basadas fundamentalmente en la experiencia local, pero no hay estudios sistemáticos que evalúen el comportamiento de este acolchado en función de su granulometría. En un estudio realizado en la campaña 2008/09, donde se midió la granulometría del acolchado de grava-arena de 30 invernaderos de la provincia de Almería, se encontró que su composición granulométrica media era un 47 % de partículas de grava fina, un 46 % de arena gruesa y un 7% de arena fina (Cuadro 1). Es decir, la capa superficial de estos suelos enarenados estaba compuesta fundamentalmente de partículas de grava fina y arena gruesa. En general, en los suelos enarenados de Almería parecen predominar dos tipos de acolchados de grava-arena (Cuadro 1), uno compuesto, sobre todo, de partículas de grava fina, que los agricultores denominan localmente capa de arena gruesa, y otro compuesto, sobre todo, de partículas de arena gruesa, que los agricultores denominan localmente capa de arena fina (Fotografía 1).

Fotografía 1. Suelo enarenado con un acolchado de grava-arena donde predominan las partículas de grava fina (izquierda) y las partículas de arena gruesa (derecha).

Invernadero	Zona	Grava fina	Arena	
			Gruesa	Fina
		2 < Ø < 10	0,25< Ø <2	0,25< Ø < 0,02
1	Las Norias	59	40	1
2	Las Norias	59	39	2
3	Las Norias	39	47	15
4	Sª Mª del Águila	69	18	13
5	Tierras de Almería	51	41	8
6	Balanegra	57	39	4
7	Balanegra	37	61	2
8	Balanegra	60	35	5
9	El Ejido	36	54	10
10	El Ejido	78	21	1
11	San Silvestre	65	29	6
12	San Agustín	86	13	0
13	Las Palmerillas	70	29	0
14	Las Palmerillas	51	48	1
15	Las Palmerillas	36	62	2
16	Las Palmerillas	87	13	1
17	Las Palmerillas	0	86	14
18	Las Palmerillas	85	13	2
19	Las Palmerillas	69	30	1
20	Las Palmerillas	50	47	3
21	Rebeque	68	31	1
22	Adra	27	65	8
23	Vega de Almería	1	86	13
24	Vega de Almería	52	47	1
25	Vega de Almería	1	75	24
26	Vega de Almería	1	81	17
27	Vega de Almería	0	83	17
28	Vega de Almería	51	47	3
29	Llanos La Cañada	53	38	9
30	La Cañada	1	75	24
Media		**47**	**46**	**7**

Cuadro 1. Granulometría de la capa superficial de grava-arena de suelos enarenados de la provincia de Almería. 2009.

2.2. Microclima del invernadero

2.2.1. Temperatura del suelo

La baja capacidad calorífica de la capa de grava-arena del suelo enarenado induce un rápido calentamiento diurno y un rápido enfriamiento nocturno de la misma, dando lugar a grandes oscilaciones térmicas diarias (Fig. 2), mientras que los cambios de temperatura diarios en las capas del suelo donde ocurre la mayor parte de la actividad radicular (con frecuencia suelo aportado) y del suelo original son más atenuados y retrasados en el tiempo, sobre todo, a medida que aumenta la profundidad.

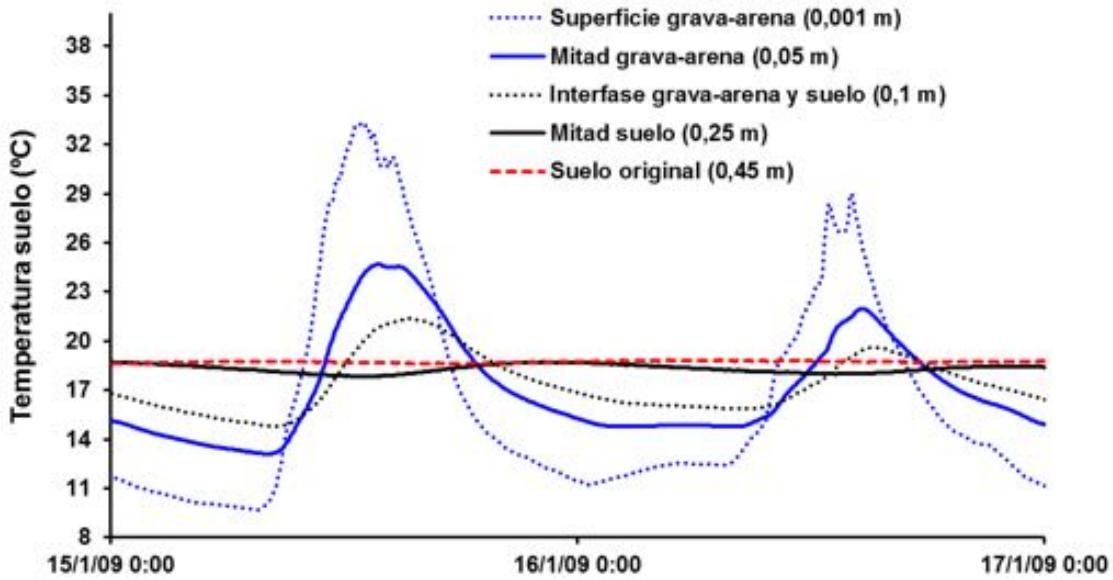


Figura 2. Dinámica de la temperatura de un suelo enarenado con una capa superficial de grava-arena de 0,1 m de espesor, una capa de suelo aportado de 0,3 m de espesor y el suelo original. Medidas realizadas a distintas profundidades durante el 15 y 16 de enero de 2009 en un invernadero sin cultivo.

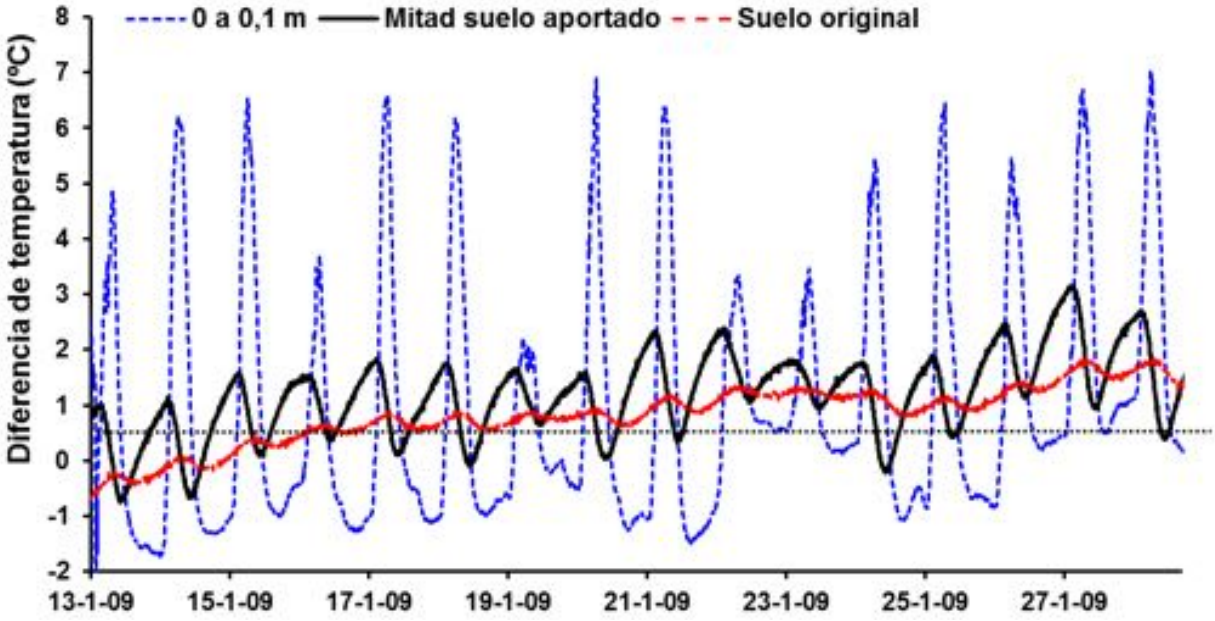
En los invernaderos mediterráneos cultivados el flujo diario de calor o energía en el suelo suele ser negativo durante el otoño y, sobre todo, la primera parte del invierno, lo que provoca una reducción progresiva de su temperatura (Fig. 3). En estos periodos, las capas del suelo más profundas, que tienen mayores temperaturas, ceden, normalmente, energía por conducción a las capas más superficiales, más frías (Fig. 3). En los suelos enarenados, el acolchado de grava-arena actúa como una barrera térmica que aumenta la resistencia a la transferencia de energía desde las capas profundas del suelo hacia su superficie, lo que reduce las pérdidas de energía del suelo en los periodos fríos (Bonachela y col., 2020). Consecuentemente, en un cultivo de pimiento en un invernadero en Almería la temperatura en la mitad de la capa de suelo aportado, donde se suelen desarrollar la mayoría de las raíces del cultivo, fue entre 1 y 2 °C mayor en el suelo enarenado con acolchado de grava-arena que en el mismo suelo sin acolchado de grava-arena durante la mayor parte del periodo frío del año (Fig. 3).

Figura 3. Temperatura media diaria en la mitad del suelo aportado y en la parte superior del suelo original en un suelo con y sin una capa superficial de grava-arena de 0,1 m de espesor. Cultivo de pimiento en un invernadero tipo parral. El Ejido, Almería. Adaptada de Bonachela y col. (2020).

A la misma conclusión se llegó en las medidas realizadas en Almería en otro invernadero sin cultivo en enero del 2009 (Fig. 4). La diferencia de temperatura en la mitad de la capa de suelo aportada entre un invernadero con suelo enarenado con acolchado de grava-arena de 0,1 m de espesor y otro invernadero idéntico con el mismo suelo al que se le retiró el acolchado de grava-arena aumentó progresivamente y después de unos días se mantuvo entre 1 y 2°C (Bonachela y col., 2020). Un comportamiento parecido se observó en la temperatura del suelo original (Fig. 4).

Una respuesta similar fue observada en los experimentos realizados en un invernadero tipo parral sin calefacción en Motril (costa de Granada), donde se comparó un cultivo de judía de mata baja en un suelo con y sin acolchado de grava-arena durante dos ciclos de cultivo (octubre-diciembre y enero-abril) en dos campañas agrícolas (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005). La temperatura media diaria del suelo a 0,1 m de profundidad (por debajo del acolchado de grava-arena en el caso del suelo enarenado), fue ligeramente mayor (≈ 0,6ºC de media) con el acolchado de grava-arena que sin dicho acolchado (Fig. 5). Las diferencias fueron mayores en las medidas realizadas a 0,05 m que a 0,1 m de profundidad y ocurrieron, sobre todo, en las fases iniciales del cultivo, cuando la cobertura vegetal era baja, durante el ciclo de otoño-invierno. A nivel diario, estas diferencias ocurrieron, sobre todo, durante la parte final del periodo diurno y el periodo nocturno (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005).

a



b

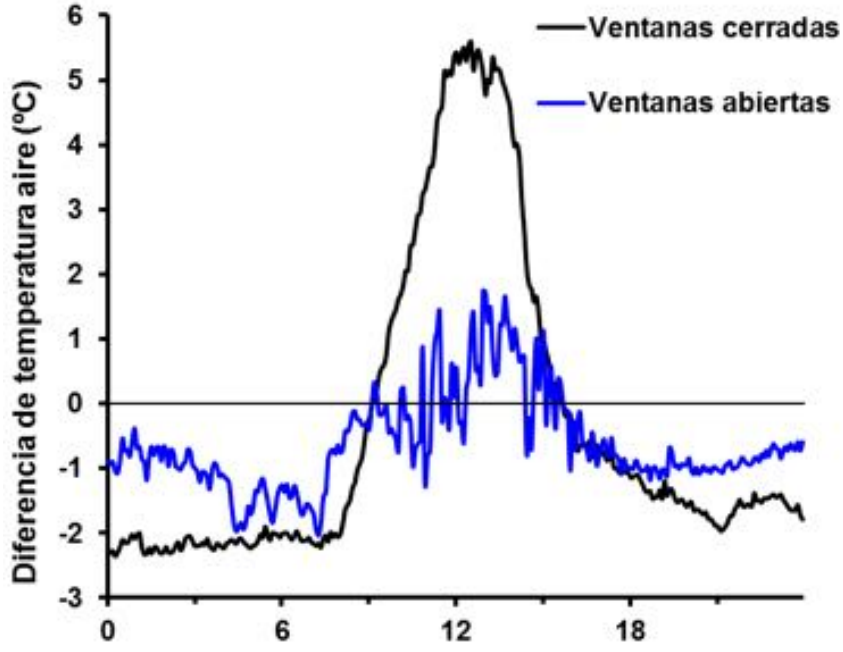


Figura 4. Dinámica diaria de la diferencia de temperatura de suelo (a) y de aire (b) entre un invernadero con un suelo enarenado con una capa superficial de grava-arena de 0,1 m de espesor y un invernadero con el mismo suelo sin la capa superficial de grava-arena. Las medidas en suelo se realizaron en los primeros 0,1 m de ambos suelos (corresponde a la capa de grava-arena del suelo enarenado con capa de grava-arena y a los primeros 0,1 m del suelo sin capa de grava-arena), en la mitad del suelo aportado y en el suelo original de ambos suelos. Las medidas en aire se realizaron a 0,3 m por encima de la superficie del suelo en ambos invernaderos durante días típicos de invierno con las ventanas cerradas (17/01/2009) y las ventanas abiertas (27/01/2009). Invernadero sin cultivo. El Ejido. Almería.

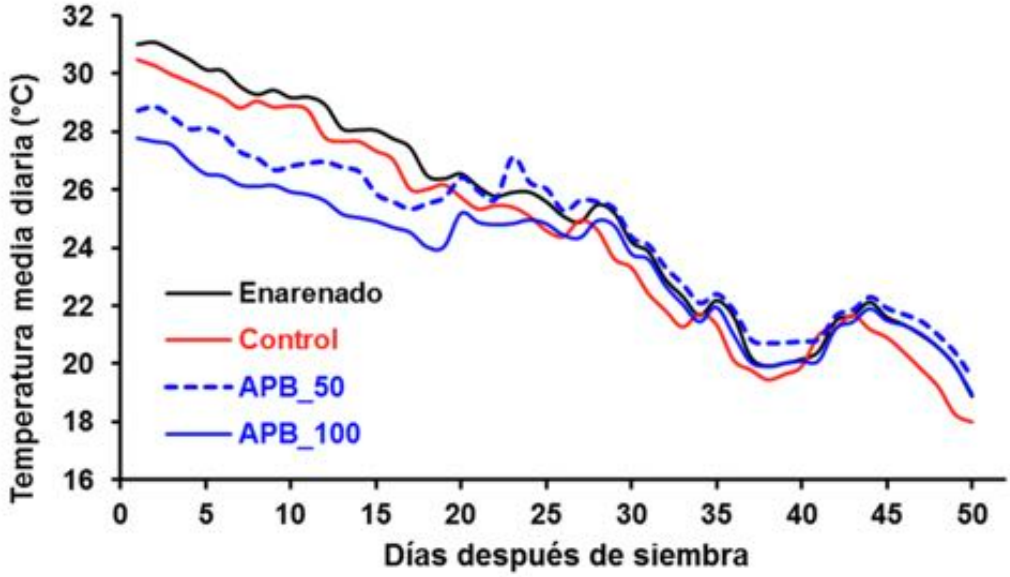


Figura 5. Dinámica de la temperatura media diaria medida a 0,1 m de profundidad de la capa de suelo aportado durante un ciclo de cultivo de judía de mata baja de otoño-invierno en un invernadero con un suelo enarenado con (Enarenado) y sin (Control) una capa de grava-arena y en el mismo suelo enarenado con capa de grava-arena y encima un acolchado de plástico blanco de 50 μm de grosor (APB_50) o un acolchado de plástico blanco bicapa de 100 μm de grosor (APB_100) con su cara blanca hacia el exterior. Elaborada a partir de datos de Escobar (2004) y Hernández y col. (2005).

2.2.2. Temperatura del aire

Los datos disponibles sobre el efecto del acolchado de grava-arena sobre la temperatura del aire que rodea al cultivo son escasos. En experimentos realizados en invernaderos sin cultivo durante el periodo frío del año (Bonachela y col., 2020), la temperatura del aire cercano al suelo enarenado (0,3 m por encima del suelo) fue claramente mayor durante el periodo diurno en el invernadero con capa de grava-arena que en el invernadero con el mismo suelo pero sin esta capa (Fig. 4), con diferencias máximas de 5 a 6°C al mediodía cuando las ventanas del invernadero estaban cerradas (Bonachela y col., 2020). En cambio, durante el periodo nocturno las temperaturas del aire cercano al suelo fueron hasta 2°C menores en el invernadero con capa de grava-arena. Estas diferencias se redujeron sustancialmente, sobre todo, las diurnas cuando las ventanas del invernadero se mantuvieron abiertas durante el periodo diurno (Fig. 4). La temperatura media diaria del aire cercano al suelo a lo largo del periodo medido (14 días) fue similar en el invernadero con acolchado de grava-arena que en el invernadero sin dicho acolchado. Lógicamente, en invernaderos con cultivos las diferencias de temperaturas diurnas y nocturnas asociadas al uso de acolchado deben reducirse a medida que aumenta la cobertura vegetal. En los experimentos con cultivos realizados en la costa de Granada (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005), los tratamientos con y sin acolchado de grava-arena estaban distribuidos al azar en el mismo invernadero, por lo que no se pudo estudiar si hubo diferencias de temperatura del aire entre tratamientos.

2.2.3. Radiación en el invernadero

En los experimentos realizados en Almería en invernaderos sin cultivo durante el periodo frío (Bonachela y col., 2020), la radiación neta disponible sobre la superficie del suelo fue sustancialmente mayor en el suelo sin acolchado de grava-arena que con dicho acolchado. Esta gran diferencia fue debida a: i) las mayores pérdidas de radiación de onda larga de la superficie del suelo con acolchado de grava-arena, como consecuencia de las altas temperaturas diurnas que se alcanzaron en la superficie del acolchado (Fig. 2); y ii) al mayor porcentaje de radiación de onda corta reflejada (albedo) por la superficie del acolchado de grava-arena (33%), comparado con la superficie del suelo sin acolchado (17%). Por otro lado, el mayor albedo del suelo con acolchado de grava-arena también puede aumentar la radiación solar incidente sobre la superficie del suelo con acolchado de grava-arena (Lorenzo y col., 2005), debido a las múltiples reflexiones de radiación entre las superficies de la cubierta del invernadero y del suelo.

En los experimentos con cultivos realizados en la costa de Granada (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005) también se encontró que la radiación solar reflejada fue ligeramente mayor en la superficie del suelo con acolchado de grava-arena que sin este acolchado, aunque las diferencias fueron menores que las observadas en los experimentos sin cultivo en Almería (Bonachela y col., 2020). Estas menores diferencias de albedo entre tratamientos con y sin acolchado de grava-arena tuvieron que ser debidas, en gran medida, a la presencia del cultivo, aunque la humedad de la superficie del acolchado/suelo y sus características superficiales también pudieron haber influido.

2.3. Crecimiento y productividad de los cultivos

En los experimentos con cultivos de judía de mata baja en la costa de Granada (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005), el índice de área foliar (IAF) y la producción de biomasa aérea (materia seca) fue mayor en el cultivo sobre suelo con capa de grava-arena que en el cultivo sobre suelo sin dicha capa en los cuatro ciclos de cultivo evaluados, con diferencias estadísticamente significativas en tres de ellos. La productividad, tanto de frutos de categoría extra como la total, también fue mayor en los cultivos de judía en suelo con acolchado de grava-arena, comparados a los cultivos sin acolchado, siendo las diferencias significativas en los cuatro ciclos de cultivo evaluados. Estas diferencias de crecimiento y productividad entre el cultivo de judía en suelo con y sin acolchado de grava-arena deben, por tanto, atribuirse a la mayor temperatura del suelo con el acolchado de grava-arena (Fig. 4), ya que la radiación incidente sobre el cultivo y la radiación absorbida por el mismo fueron similares, así como la temperatura del aire que rodeaba a los cultivos.

3. Acolchados de plástico

3.1. Descripción y uso

El uso de láminas plásticas como acolchados agrícolas ha aumentado considerablemente en muchas zonas del mundo (Kader y col., 2017) y, hoy en día, los acolchados plásticos se usan, con distintas funciones, en muchos cultivos. Los plásticos transparentes (muy transmisivos) son usualmente

considerados los más efectivos para calentar el suelo en cultivos al aire libre, aunque en algunos casos los plásticos negros (muy absorbentes) pueden ser igual de efectivos o más si el plástico está en estrecho contacto con el suelo, lo que incrementa la transferencia de energía por conducción entre ambas superficies (Ham y col., 1993). Además, los plásticos poco transmisivos, como el negro, permiten controlar las malas hierbas. Por último, los plásticos de alta reflexión, pueden reducir la temperatura del suelo y aumentar la radiación fotosintéticamente activa (PAR) que llega a los cultivos en invernadero (Lorenzo y col., 2005). En la provincia de Almería el 17 % de la superficie bajo invernadero usa acolchados plásticos, fundamentalmente, para evitar el crecimiento de malas hierbas, pero también para mantener la humedad y reducir la evaporación del suelo, mejorar las condiciones térmicas del sistema radicular del cultivo o evitar el contacto entre los frutos y el suelo (García y col., 2016). En estos invernaderos el material plástico más utilizado como acolchado es la lámina de plástico negra (92 % de la superficie de invernaderos con acolchados plásticos) y, en mucha menor medida, láminas de plásticos blancos o mallas plásticas negras (García y col., 2016).

3.2. Acolchados de plástico negro

Los acolchados de plástico negro más usados en los cultivos hortícolas en invernaderos del litoral de Almería son láminas de polietileno de poco espesor (20 a 100 μm) y anchos variables (0,5 a 6,8 m), que cubren parcial o totalmente el suelo (Fotografías 2 y 3). Es frecuente que sean micro-perforados. Estos materiales suelen tener coeficientes de absorción a la radiación de onda corta muy altos (≥ 95%) y bajos coeficientes de transmisión a la radiación de onda larga (absorben gran parte de esta radiación). Los plásticos transparentes, muy usados en cultivos al aire libre y apenas usados en cultivos en invernaderos, suelen tener coeficientes de transmisión a la radiación de onda corta muy altos (≥ 90%) y coeficientes de transmisión a la radiación de onda larga variables en función de que sea o no térmico.

Fotografía 2. Invernaderos con suelo enarenado y un acolchado de plástico negro en un cultivo de pepino en suelo (izquierda) y en sacos de sustrato (derecha).

Fotografía 3. Invernadero con un cultivo de calabacín en un suelo con un acolchado de plástico negro microperforado que cubre parcialmente el suelo.

3.2.1. Microclima del invernadero

Acolchado plástico negro versus acolchado plástico transparente (sin cultivo)

En un experimento sin cultivo realizado durante el periodo frío (campaña agrícola 2008/09) se comparó la temperatura del suelo y del aire cercano al suelo en un invernadero con toda su superficie cubierta con un plástico negro de 30 μm frente a otro invernadero con toda su superficie cubierta con un plástico transparente de 35 μm, ambos acolchados plásticos en contacto con la superficie del suelo (Bonachela y col., 2012). Los dos invernaderos eran idénticos y tenían el mismo suelo enarenado con un acolchado de grava-arena. La temperatura en la mitad de la capa de suelo aportado (0,25 m de profundidad), que era prácticamente la misma en los dos invernaderos al inicio del experimento, fue haciéndose progresivamente mayor en el invernadero con plástico negro hasta que la diferencia de temperatura media diaria entre ambos invernaderos se estabilizó en torno o ligeramente por encima de 1°C al final del periodo de medida cuando el invernadero tenía las ventanas cerradas (Fig. 6). Esta diferencia se redujo prácticamente a la mitad cuando posteriormente las ventanas se mantuvieron abiertas en el periodo diurno. Una respuesta bastante similar se encontró en la temperatura del acolchado de grava-arena (Fig. 6) y de la capa de suelo original, medida a 0,45 m de profundidad (datos no mostrados).

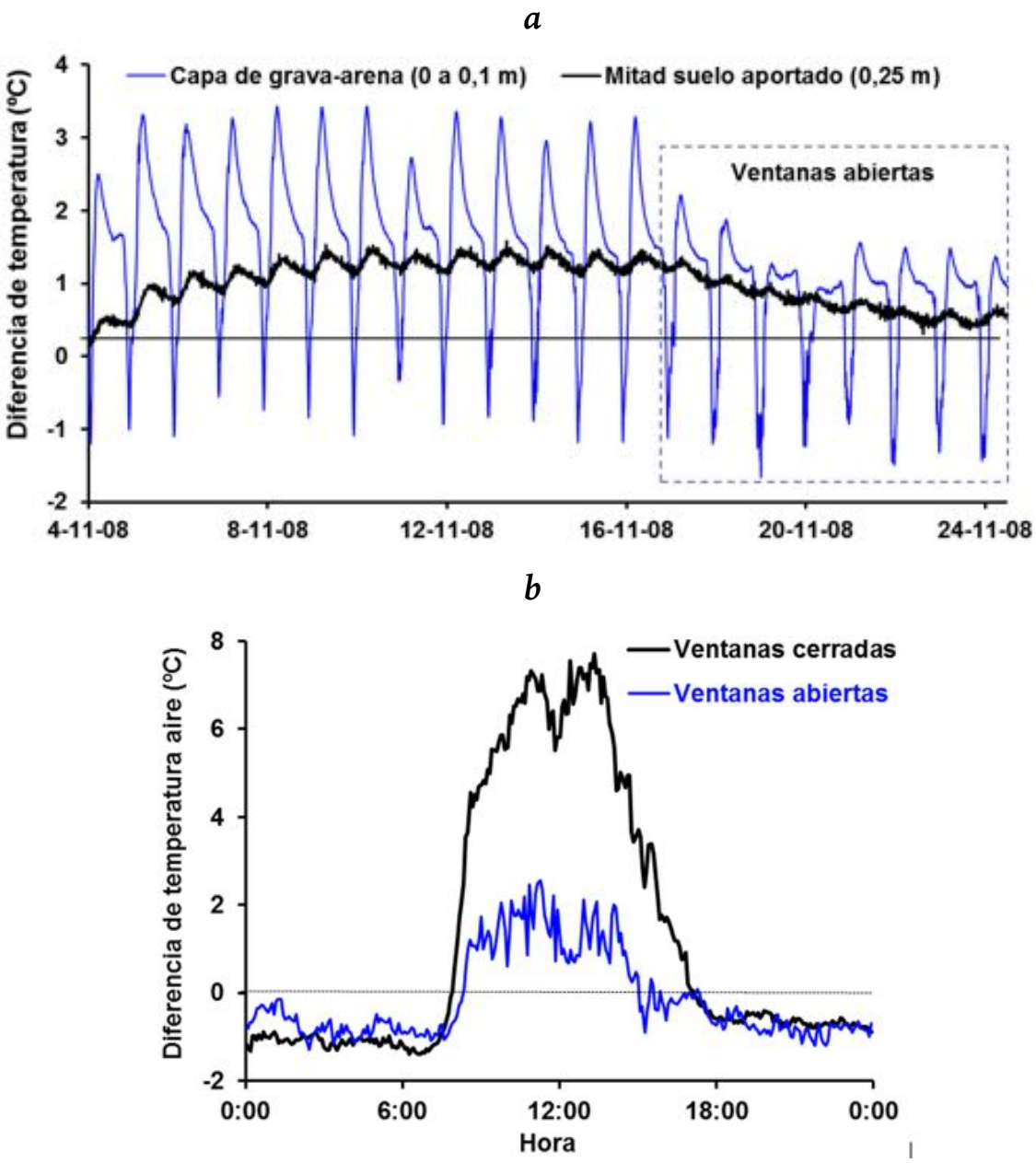


Figura 6. Dinámica de la diferencia de temperatura de suelo (a) y aire (b) entre dos invernaderos idénticos con el mismo suelo enarenado, uno con acolchado plástico negro y otro con acolchado plástico transparente. Las medidas en suelo se realizaron en los primeros 0,1 m de ambos suelos (capa de grava-arena del suelo enarenado) y en la mitad del suelo aportado (0,25 m de profundidad). Las medidas en aire se realizaron a 0,3 m por encima del suelo en ambos invernaderos durante días típicos de invierno con las ventanas primero cerradas y luego abiertas. Invernaderos sin cultivo. Adaptada de Bonachela y col. (2012).

Este comportamiento del plástico negro, en comparación al transparente, es distinto al que normalmente se ha encontrado en los cultivos al aire libre, donde el plástico transparente es generalmente el más recomendado para aumentar la temperatura del suelo (Stapleton, 2000). A la mayor temperatura observada en el suelo del invernadero con acolchado plástico negro debió contribuir sustancialmente el menor intercambio de calor por

convección entre la superficie de plástico negro y el aire del invernadero, debido a la muy baja velocidad del aire dentro del invernadero (Fernández y col., 2010), en comparación con la velocidad del aire en cultivos al aire libre. Como consecuencia, las temperaturas en la superficie del plástico negro fueron mucho mayores que las normalmente observadas en acolchados negros en cultivos en al aire libre, lo que pudo inducir el mayor flujo de calor por conducción observado en la superficie de la capa superior de grava y arena del invernadero con acolchado plástico negro (Bonachela y col., 2012). La radiación neta diaria fue, lógicamente, mayor en el invernadero con plástico negro que con transparente, especialmente durante el día, debido principalmente al menor albedo de la superficie del acolchado negro.

La temperatura del aire medida a 0,3 m sobre el suelo en un invernadero sin cultivo (Bonachela y col., 2012), que es de gran de interés, sobre todo, en las fases iniciales de los cultivos hortícolas, también fue mayor en el invernadero con plástico negro que en el invernadero con plástico transparente durante el periodo diurno, con diferencias de hasta 7°C al mediodía solar cuando las ventanas del invernadero estaban cerradas (Fig. 6). Esta mayor temperatura diurna del aire del invernadero estuvo asociada a las elevadas temperaturas diurnas de la superficie del plástico negro. En cambio, la temperatura del aire nocturna fue ligeramente menor (0,5 a 1°C) en el invernadero con acolchado plástico negro, lo que debe ser considerado en ciclos de cultivos que comiencen en el periodo frío del año. El mismo comportamiento entre invernaderos se encontró cuando las ventanas estaban abiertas durante el periodo diurno, pero las diferencias se atenuaron, sobre todo, en el periodo diurno. A escala diaria, la ganancia media de temperatura del aire inducida por el acolchado plástico negro fue de 1,4 °C cuando las ventanas estaban cerradas y no hubo diferencias cuando las ventanas estaban abiertas durante el periodo diurno.

Acolchado con plástico negro versus no acolchado plástico (sin cultivo)

En otro experimento sin cultivo realizado durante el periodo frío de la campaña 2008/09 se comparó la temperatura del suelo y del aire cercano al suelo en dos invernaderos idénticos con el mismo suelo enarenado con acolchado de grava-arena. La superficie de un invernadero se cubrió con un plástico negro de 30 μm y la superficie del otro no se cubrió con acolchado plástico (Bonachela y col., 2012). La temperatura en la mitad de la capa de suelo aportado (a 0,25 m de profundidad) disminuyó en los dos invernaderos durante este experimento, pero la reducción fue mayor en el invernadero sin acolchado plástico (Fig. 7). Al final, la temperatura media diaria en la mitad del suelo aportado fue de 19,3 °C en el invernadero con acolchado plástico negro y de 18,1°C en el invernadero sin acolchado plástico, a pesar de que al inicio del experimento la temperatura era ligeramente mayor en el invernadero sin acolchado plástico. Una respuesta bastante similar se encontró en la temperatura del acolchado de grava-arena (Fig. 7) y de la capa de suelo original, medida a 0,45 m de profundidad (datos no mostrados).

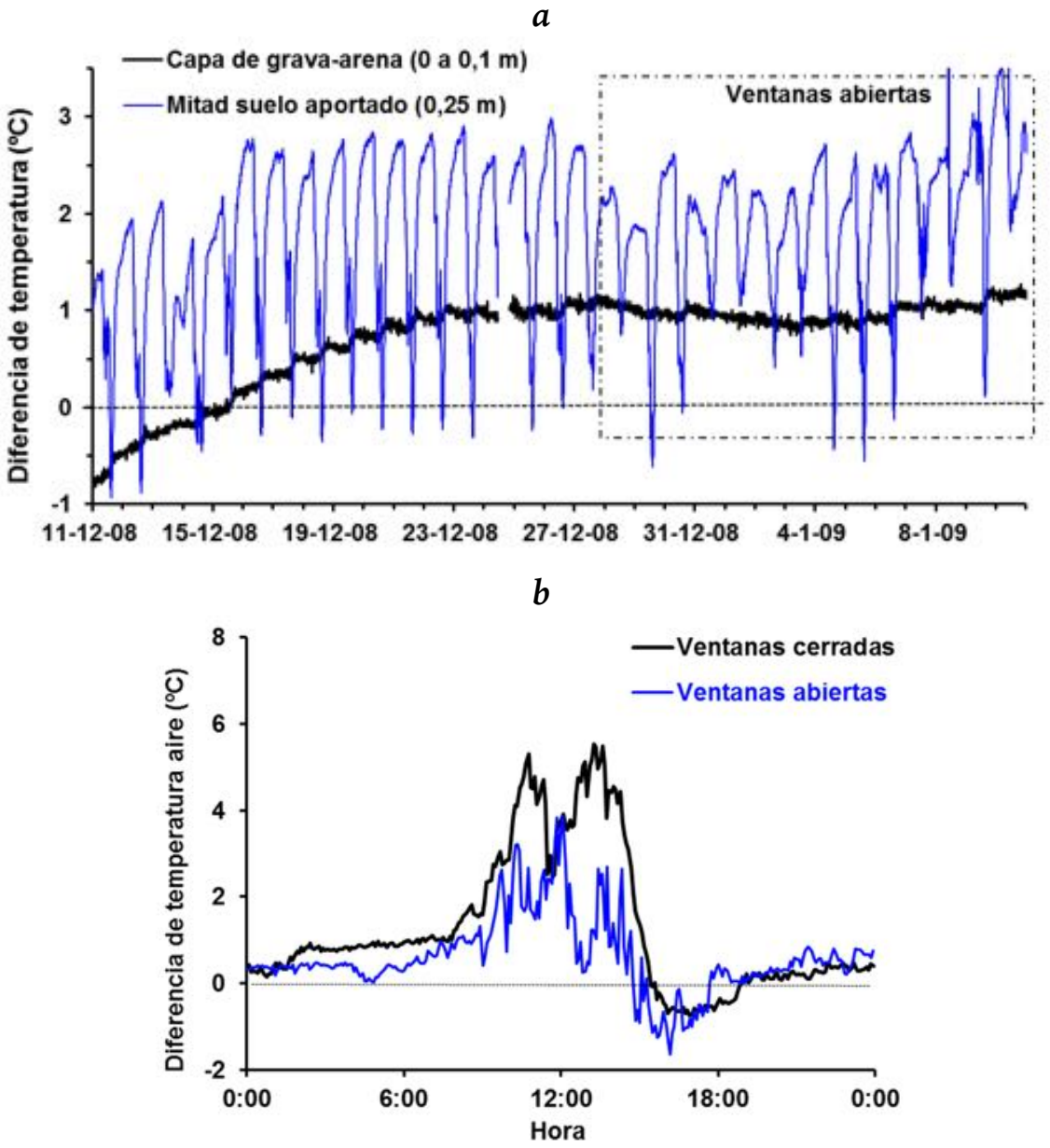


Figura 7. Dinámica de la diferencia de temperatura de suelo (a) y de aire (b) entre dos invernaderos idénticos con el mismo suelo enarenado, uno con un acolchado de plástico negro y otro sin acolchado plástico. Las medidas en suelo se realizaron en los primeros 0,1 m de ambos suelos (corresponde a la capa de grava-arena del suelo enarenado) y en la mitad del suelo aportado (0,25 m de profundidad). Las medidas en aire se realizaron a 0,3 m por encima de la superficie del suelo en ambos invernaderos durante días típicos de invierno con las ventanas cerradas y las ventanas abiertas Invernaderos sin cultivo. Figura adaptada de Bonachela y col. (2012).

La temperatura del aire media a 0,3 m sobre el suelo en invernaderos sin cultivo (Bonachela y col., 2012) también fue mayor en el invernadero con acolchado plástico negro que en el invernadero sin acolchado plástico durante el periodo diurno, con diferencias de hasta 4-5°C al mediodía solar cuando las ventanas del invernadero estaban cerradas (Fig. 7). Por la noche, la temperatura del aire fue

relativamente similar en los dos invernaderos. El mismo comportamiento entre invernaderos se encontró cuando las ventanas estaban abiertas durante el periodo diurno, pero con menores diferencias térmicas diurnas (Fig. 7). A escala diaria, la ganancia media de temperatura del aire inducida por el acolchado plástico negro fue de 1,0°C cuando las ventanas estaban cerradas y de 0,8°C cuando las ventanas estaban abiertas durante el periodo diurno.

Acolchado con plástico negro versus no acolchado plástico (con cultivo)

En otro experimento realizado posteriormente durante el periodo frío de la campaña 2014/15 se evaluó la respuesta de un ciclo de otoño-invierno de pepino en sacos de fibra de coco al uso de un acolchado plástico negro. El experimento se realizó en dos invernaderos multitúneles idénticos con el mismo suelo enarenado con capa de grava-arena, uno con un acolchado plástico negro que cubría toda la superficie del suelo y otro sin acolchado plástico. El material plástico fue un trícapa micro-perforado de 25 µm de espesor (Sotrafilm NG, Sotrafa S.A., Almería, España) con coeficientes de transmisión, reflexión y absorción a la radiación de onda corta de 0,01, 0,04 y 0,95, respectivamente, y un coeficiente de transmisión a la radiación de onda larga de 0,15 (datos del fabricante). En los dos invernaderos se instaló, previamente al cultivo, un doble techo plástico fijo siguiendo las prácticas locales: láminas de polietileno de 37,5 μm de espesor (Sotrafilm DC AF, Sotrafa, España) formando un techo simétrico plano de 9º de pendiente por encima del de la cubierta vegetal del cultivo (entre 2,20 y 2,80 m de altura) y unidas herméticamente con alambres. Estas láminas plásticas tenían un coeficiente de transmisión a la radiación de onda corta de 0,97 (datos del fabricante).

El acolchado plástico negro aumentó durante la mayor parte del ciclo de cultivo de pepino la temperatura media diaria del saco de fibra de coco y de la capa de suelo aportado del suelo enarenado (Fig. 8). Promediando a lo largo del ciclo de cultivo, la temperatura media en el interior de los sacos de fibra de coco fue de 19,6ºC en el invernadero con acolchado plástico negro y de 17,8ºC en el invernadero sin acolchado plástico, mientras que en la mitad de la capa de suelo aportado del suelo enarenado fue de 21,8 y 20,3ºC, respectivamente.

La temperatura media diaria del aire, a 2,0 m por encima del suelo, fue similar en los invernaderos con y sin acochado plástico negro durante la mayor parte del ciclo del pepino. Sin embargo, las temperaturas medias horarias del aire fueron mayores en el invernadero con acolchado negro durante el periodo diurno, comparadas con el invernadero sin acolchado plástico, y lo contrario ocurrió durante la noche. Promediando durante el cultivo, la temperatura media diurna del aire en los invernaderos con y sin acolchado plástico negro fue de 22,0 y 21,4ºC, respectivamente, mientras que las correspondientes temperaturas medias nocturnas fueron de 13,2 y 13,5ºC. El aumento de la temperatura del suelo con el acolchado del plástico negro puede explicarse por la mayor radiación neta diaria disponible dentro del invernadero con plástico negro, especialmente durante el periodo diurno (menor albedo del acolchado negro), y por las muy altas

temperaturas diurnas que se alcanzan en la superficie del plástico negro (Bonachela y col., 2012). Por otro lado, el uso de acolchados plásticos negros puede originar temperaturas del sustrato y del suelo muy altas en periodos cálidos al inicio del cultivo, como ocurrió al inicio de este ciclo de pepino (Fig. 8). Para evitarlas es importante poder colocar el acolchado plástico negro justo al inicio del periodo frío del ciclo.

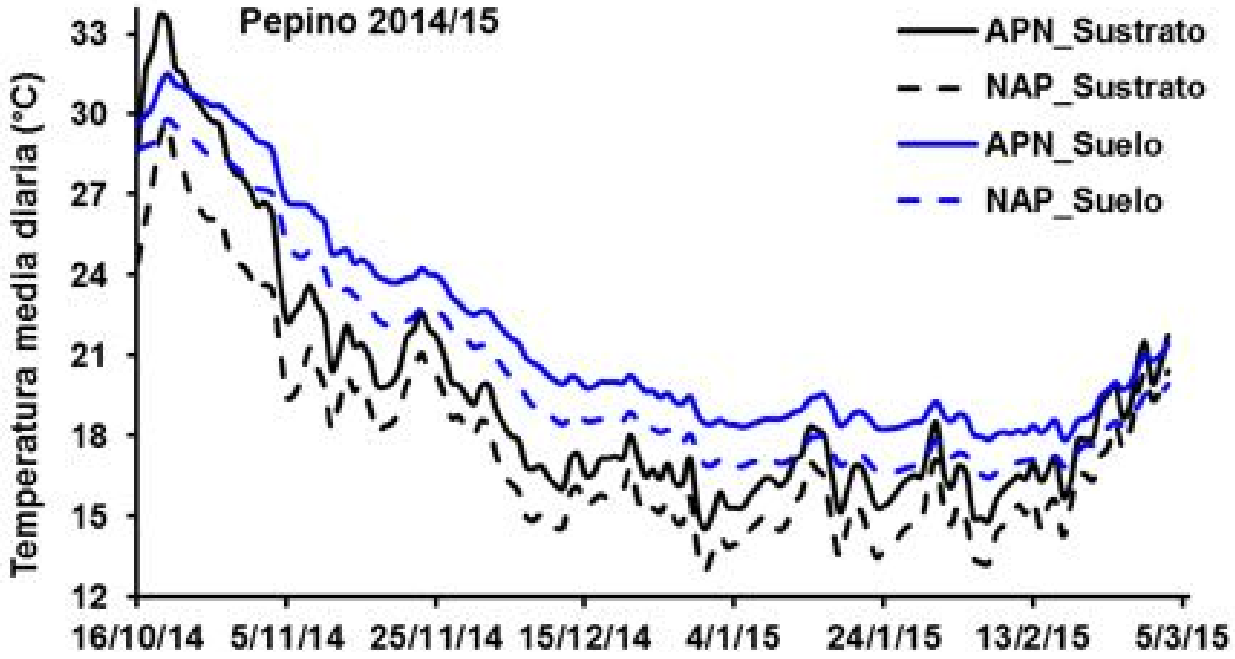


Figura 8. Dinámica de la temperatura media diaria en el interior del saco de fibra de coco y en la mitad de la capa de suelo aportado (0,25 m de profundidad) durante un ciclo de cultivo de pepino de otoño-invierno en dos invernaderos idénticos con el mismo suelo enarenado, uno con un acolchado plástico negro (APN) y otro sin acolchado plástico (NAP).

Con respecto a la humedad relativa del aire, medida a 2,0 m por encima del suelo, no hubo, en general, diferencias destacables entre el cultivo con y sin acolchado plástico negro. La radiación solar que llegó al cultivo también fue similar en los dos invernaderos durante la mayor parte del ciclo del pepino: la transmisividad media diaria del invernadero a la radiación de onda corta, medida al principio y justo después del final del ciclo del pepino, fue similar en los invernaderos con (0,56) y sin (0,55) acolchado plástico negro.

3.2.2. Crecimiento y productividad de los cultivos

En el experimento realizado durante el periodo frío de la campaña 2014/15 con un cultivo de pepino en sacos de fibra de coco, el acolchado plástico negro aumentó ligeramente la producción de materia seca aérea e indujo un mayor reparto de ésta hacia los frutos, en relación al cultivo sin acolchado plástico (Cuadro 2). Al final del ciclo, el pepino con acolchado plástico negro produjo una biomasa de frutos significativamente mayor (511 frente a 429 g m^{-2}) y tuvo un índice de cosecha significativamente mayor (66,4 frente a 61,7 %). Con respecto a la productividad

final, el peso fresco acumulado de frutos totales, comerciales y de primera categoría fue significativamente mayor en el cultivo con acolchado plástico negro (Cuadro 2), mientras que el rendimiento no comercial fue similar en ambos tratamientos. El mayor rendimiento comercial del cultivo con acolchado plástico negro fue debido a un mayor número de frutos y a un mayor peso de los mismos (Cuadro 2). Por otro lado, no se han encontrado datos disponibles sobre el efecto del uso de plásticos transparentes en el crecimiento y productividad de los cultivos hortícolas en invernaderos del litoral mediterráneo español.

Tratamientos	Materia seca aérea (g m^{-2})			IAF	IC
	Total	Vegetativa	Reproductiva	(m^{-2} m^{-2})	(%)
APN	768,0 a	257,3 a	510,7 a	4,4 a	66,4 a
NAP	701,9 a	273,1 a	428,9 b	4,6 a	61,7 b

	Productividad (kg m^{-2})				Componentes de la productividad comercial	
	Total	Comercial		Destrío	Número de frutos (frutos m^{-2})	Peso medio fruto (g fruto^{-1})
		Total	Primera			
APN	11,9 a	10,4 a	9,9 a	1,6 a	26,8 a	387,8 a
NAP	10,4 b	8,8 b	8,1 b	1,5 a	24,0 b	364,3 b

Distintas letras en la misma columna indica la ocurrencia de diferencias significativas (P<0,05).

Cuadro 2. Materia seca o biomasa aérea y su reparto, índice de área foliar (IAF), índice de cosecha (IC), productividad y componentes de la productividad comercial de dos cultivos de pepino crecidos en dos invernaderos con suelos enarenados y dobles techos fijos, uno con acolchado plástico negro (APN) y otro sin acolchado plástico (NAP).

3.3. Acolchados de plástico blanco

El acolchado con plásticos muy reflectantes, como el blanco, se utiliza normalmente en invernaderos de alta tecnología con sistemas de calefacción activos para aumentar la luz disponible durante los periodos de baja radiación e incrementar el crecimiento de las plantas. Los acolchados plásticos blancos más usados en los cultivos hortícolas en invernaderos del litoral de Almería son láminas de polietileno de poco espesor (20 a 100 μm) bicapas, con una cara de color blanco y otra de color negro. Estos materiales, instalados con su cara blanca hacia el exterior, suelen tener altos coeficientes de reflexión a la radiación de onda corta (≥ 50%), absorben prácticamente el resto de la radiación solar que les llega (apenas transmiten radiación solar) y tienen bajos coeficientes de transmisión a la radiación de onda larga (absorben gran parte de esta radiación).

3.3.1. Microclima del invernadero

Acolchado plástico blanco versus no acolchado plástico (pepino)

En un estudio realizado en Almería en dos invernaderos idénticos sin calefacción y con una capa superficial de 0,15 m de espesor de grava sobre el suelo original, Lorenzo y col. (2005) evaluaron durante dos ciclos la respuesta de un cultivo de pepino en sacos de perlita (un ciclo de otoño-invierno y otro de primavera) al uso de un acolchado plástico blanco, comparándolo con un cultivo sin

acolchado plástico. El material plástico del acolchado fue polietileno coextruido de baja densidad, de 100 μm de espesor, blanco y negro, que cubría toda la superficie del suelo del invernadero con su cara blanca hacia arriba.

En las primeras fases de ambos ciclos de cultivo, como puede verse en la figura 9 para el ciclo de otoño-invierno, cuando el cultivo tenía una baja cobertura vegetal, las temperaturas medias del aire y del sustrato de perlita fueron más bajas en el invernadero con acolchado plástico blanco que sin acolchado (hasta 1,5 ºC y 3,0 ºC respectivamente), ya que la mayor radiación reflejada por el invernadero con plástico blanco redujo la energía disponible dentro del mismo (Berninger, 1989). Posteriormente, conforme el cultivo aumentó su área foliar las diferencias térmicas se fueron reduciendo. No hubo diferencias destacables en la humedad relativa del aire entre los invernaderos con y sin acolchado plástico blanco en ninguno de los dos cultivos evaluados. Además, la transmisividad media del invernadero a la radiación solar durante el ciclo de otoño-invierno fue del 59,3 y 57,3%, respectivamente, para el cultivo con y sin plástico blanco, mientras que en el ciclo de primavera fue del 65,8 y 64,3%, respectivamente. Es decir, el plástico blanco incrementó un 2,0 y un 1,5% la radiación solar exterior que llegó al ciclo de cultivo de otoño-invierno y de primavera, respectivamente. La radiación reflejada y el porcentaje de radiación reflejada (albedo) fueron mayores en el cultivo con acolchado plástico blanco, especialmente cuando la cobertura vegetal era baja (a los 18 días después de siembra del ciclo de otoño-invierno el albedo fue del 55,1 y 19,7% para el cultivo con y sin acolchado plástico, respectivamente), pero estas diferencias disminuyeron en ambos ciclos de cultivo a medida que los cultivos aumentaron su crecimiento y cobertura vegetal.

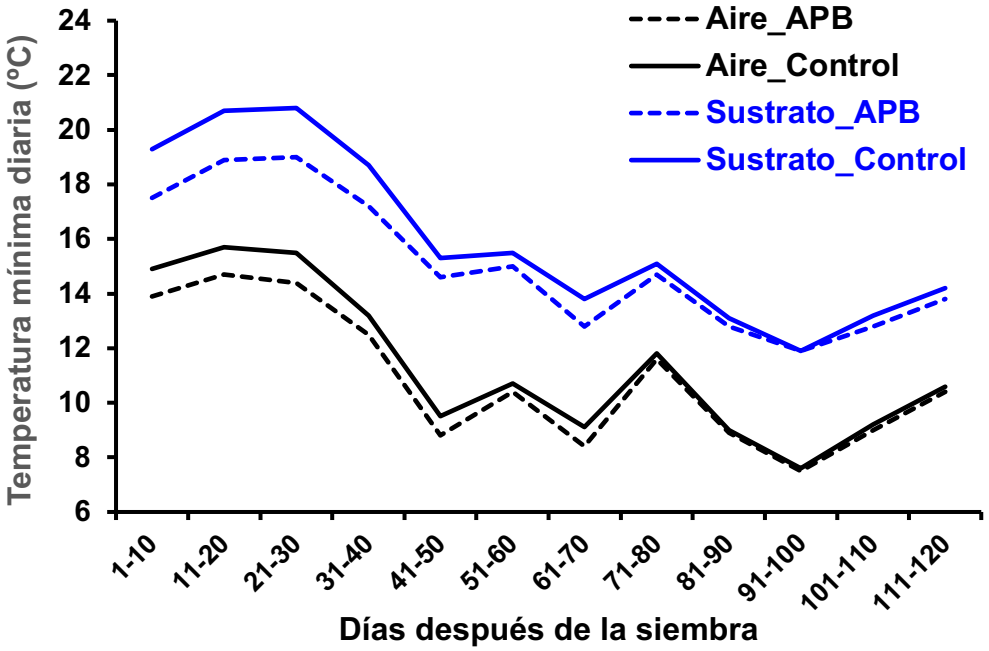


Figura 9. Evolución de la temperatura mínima diaria, promediada cada 10 días de la temperatura del aire y del sustrato de perlita durante un ciclo cultivo de pepino de otoño-invierno en dos invernaderos iguales en los que se ha aportado una capa de grava, uno con un acolchado plástico blanco (APB) y otro sin acolchado plástico (Control). Elaborado a partir de datos de Lorenzo y col. (2005).

Fotografía 4. Cultivo de berenjena en un invernadero con un suelo enarenado y acolchado plástico blanco.

Acolchado plástico blanco versus no acolchado plástico (judía)

En los experimentos realizados en la costa de Granada en un invernadero parral sin calefacción, descritos anteriormente (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005), se evaluó el microclima y la respuesta de un cultivo de judía de mata baja en un suelo enarenado con capa de grava-arena a dos acolchados plásticos blancos: una

lámina de polietileno de 50 µm de grosor y una lámina de polietileno coextruido de dos capas de 100 µm de grosor. Estos tratamientos se evaluaron simultáneamente y en el mismo invernadero que los cultivos en suelo enarenado con y sin capa de grava-arena, anteriormente descritos (sección 2), por lo que la temperatura del aire fue igual o similar para todos los tratamientos estudiados.

Los acolchados de plástico blanco provocaron una alta reflexión de la radiación solar incidente, con valores superiores al 60% al inicio de los ciclos de cultivo evaluados, reflexión, que se fue reduciendo conforme el cultivo creció y aumentó su cobertura vegetal. Cuando el cultivo alcanzó índices de área foliar cercanos a 2 m^2 m^{-2} sombreó gran parte del suelo y redujo casi totalmente la reflexión de la radiación en la superficie del suelo. Los valores de reflexión de la radiación de onda corta medidos en los dos acolchados blancos evaluados fueron similares entre sí, pero muy superiores a los medidos en el suelo enarenado sin acolchado plástico (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005). Una parte sustancial de la radiación reflejada por la superficie de los plásticos blancos fue re-interceptada por el cultivo (≈ 10% de la radiación incidente), lo que supuso un aporte extra de radiación solar para la fotosíntesis de estos cultivos. Los dos acolchados de plástico blanco redujeron claramente la temperatura del suelo durante el periodo cuando el cultivo lo cubría parcialmente (hasta un índice de área foliar de 2 m^2 m^{-2}), en comparación al cultivo sin acolchado plástico (Fig. 5), lo que puede atribuirse a la menor la radiación disponible en la superficie del invernadero por la alta reflexión de los plásticos blancos. La temperatura media del suelo en el cultivo con plástico blanco bicapa durante el periodo cuando el cultivo cubría parcialmente la superficie del suelo fue entre 1,3 y 1,7ºC menor que en el cultivo sin plástico blanco. La reducción de la temperatura del suelo fue ligeramente menor con el plástico blanco de una capa (50 μm) que con el plástico blanco bicapa (100 μm), lo que pudo ser debido al mayor espesor del acolchado bicapa, ya que la reflexión de radiación solar fue similar en los dos acolchados blancos. A escala diaria, hubo diferencias de temperatura de suelo entre los cultivos con y sin acolchados plásticos blancos durante todo el día, pero las mayores diferencias ocurrieron durante gran parte del periodo diurno (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005).

3.3.2. Crecimiento y productividad de los cultivos

Acolchado plástico blanco versus no acolchado plástico (pepino)

En los experimentos realizados en los invernaderos sin calefacción en Almería (Lorenzo y col., 2005), las menores temperaturas del aire y del sustrato de perlita en el cultivo con acolchado plástico blanco, comparadas con el cultivo sin acolchado plástico (Fig. 9), provocaron un desarrollo más lento y un menor crecimiento de las plantas durante los periodos en los que las temperaturas del aire/sustrato fueron sub-optimas (Toki y col., 1978; Nisen y col., 1988). La temperatura mínima del sustrato recomendada es 15ºC (Nisen y col., 1988). Como consecuencia, el acolchado plástico blanco redujo el índice de área foliar y la producción de materia seca

aérea a partir de los 31 días después de siembra en el ciclo de otoño-invierno, cuando las temperaturas claramente disminuyeron. En el ciclo de primavera el acolchado plástico blanco solo redujo significativamente el crecimiento al principio del ciclo, cuando las temperaturas eran más bajas. Posteriormente, las temperaturas del aire y del suelo no fueron limitantes. En el cultivo sin acolchado plástico, la radiación interceptada y absorbida por el cultivo fueron muy similares debido a la baja reflexión del suelo con la capa de grava (Baille, 1999), mientras que en el cultivo con acolchado plástico blanco la radiación absorbida por el cultivo fue mayor que la interceptada, sobre todo, en el ciclo de otoño-invierno. Globalmente, tanto la radiación interceptada como la absorbida fue menor en el cultivo con acolchado plástico blanco debido a su desarrollo más lento y a su menor crecimiento, sobre todo, en el ciclo de otoño-invierno. La superficie foliar específica fue también, generalmente, menor en el cultivo con acolchado plástico, lo que pudo estar asociado a la mayor radiación incidente y reflejada que le llegó (Giménez y col., 2002). Por último, la productividad precoz y total fue significativamente mayor en el cultivo sin acolchado plástico en el ciclo de otoño-invierno, mientras que en el ciclo de primavera solo hubo diferencias significativas en la productividad precoz (Cuadro 3).

Ciclo	Tratamientos	Productividad precoz	Productividad total
Otoño-invierno	APB	2,30 b	5,64 b
	Control	3,01 a	6,64 a
Primavera	APB	6,12 b	15,53 a
	Control	7,06 a	16,10 a

Cuadro 3. Productividad precoz y total (kg m^{-2}) de un cultivo de pepino en dos invernaderos de plástico idénticos, uno con acolchado plástico blanco (APB) y otro sin acolchado plástico (Control), durante un ciclo de otoño-invierno y otro de primavera. Distintas letras en la misma columna indican la ocurrencia de diferencias significativas (P<0,05). Elaborado a partir de datos de Lorenzo y col. (2005).

Acolchado plástico blanco versus no acolchado plástico (judía)

En los experimentos con judía de mata baja en la costa de Granada (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005) el índice de área foliar y la producción de materia seca aérea final fueron, generalmente, menores en los cultivos en suelos enarenados con acolchados plásticos blancos que sin acolchado plástico, aunque las diferencias solo fueron estadísticamente significativas en tres de los seis ciclos evaluados. Estas diferencias fueron mayores durante el periodo inicial de los ciclos de invierno-primavera, cuando las temperaturas del suelo presentaron los valores más bajos. Además, en cuatro de los seis ciclos de cultivo evaluados, la productividad final, tanto de frutos de categoría extra como la total, fue significativamente menor en los cultivos en suelo enarenado con acolchados

plásticos blancos. Por otro lado, no hubo diferencias destacables en los parámetros de crecimiento y productividad entre los cultivos con plástico blanco de una capa (50 μm de grosor) y bicapa (100 μm de grosor), aunque el cultivo con el plástico blanco de menor grosor presentó valores de los parámetros de crecimiento y productividad ligeramente mayores en algunos ciclos. Como resumen, en una zona mediterránea el uso de acolchados plásticos blancos sobre suelos enarenados no mejoró el crecimiento ni la productividad del cultivo de judía de mata baja en invernadero, sino que en algunas campañas los redujo. Por lo tanto, la temperatura del suelo fue un factor limitante del crecimiento y la productividad del cultivo de judía de mata baja en invernadero en ciclos en torno al periodo frío del año.

Por otro lado, los principales parámetros de crecimiento y productividad al final de los ciclos de cultivo de judía fueron, en general, mayores en los cultivos con acolchados plásticos blancos que en los cultivos sin acolchados de grava-arena ni de plástico, siendo las diferencias significativas en dos de los cuatro ciclos de cultivo evaluados, mientras que las temperaturas del suelo fueron menores en los cultivos con plásticos blancos (Fig. 5). Sin embargo, durante el periodo inicial de los ciclos de judía de invierno-primavera, cuando las temperaturas del suelo presentaron los valores más bajos, los parámetros de crecimiento evaluados fueron menores en los cultivos con acolchados plásticos blancos que en el cultivo sin acolchado de grava-arena ni de plástico (Escobar, 2004; Hernández y col., 2005). Es decir, la temperatura del suelo parece ser el factor que más limitó el crecimiento y la productividad del cultivo de judía en suelo en ciclos de cultivo en torno al invierno, sobre todo, en los periodos más fríos del ciclo. La re-interceptación de la radiación reflejada por la superficie del suelo con acolchados plásticos blancos también influyó en el crecimiento y productividad de estos ciclos de judía compensando parcial (cultivos en suelo con acolchado de grava-arena y plásticos blancos frente a los cultivos con acochado de grava-arena) o totalmente (cultivos en suelo con acolchado de grava-arena y plástico blanco frente a cultivos en suelos sin ningún acolchado) el menor crecimiento o la menor productividad asociadas a la diferencias de temperatura de suelo/aire entre estos tratamientos. Por ello, puede ser de interés agronómico evaluar la utilización de acolchados reflectantes en cultivos en invernaderos mediterráneos en ciclos en torno al periodo cálido.

4. Mejoras y necesidades futuras

El uso de acolchados de grava-arena sigue siendo la práctica más extendida en los invernaderos de Almería, pero desde hace unos años se está cuestionando por un número creciente de agricultores y técnicos asesores de cultivo, sobre todo en los cultivos ecológicos. Los acolchados de grava-arena, a pesar de aportar numerosas ventajas (Bonachela y col., 2020) que pueden mejorar la productividad de los cultivos (Escobar, 2004, Hernández y col., 2005), son laboriosos de mantener y dificultan la incorporación de restos de cultivos y materia orgánica al suelo. Aparte de otras consideraciones, la necesidad de eliminar los residuos vegetales de los cultivos y los costes que está práctica conlleva, ha llevado a muchos

agricultores con suelos enarenados a aportar los restos de cosecha en la capa superficial del suelo, siguiendo las técnicas que han desarrollado agricultores de las zonas de Dalías y Berja en invernaderos sin enarenar. El cambio a cultivo ecológico que ha tenido lugar en muchas explotaciones de invernaderos ha acelerado este proceso. El aporte continuado de restos vegetales y estiércol a la capa de grava-arena y los laboreos anuales acaban originando un horizonte superficial híbrido, que se aleja más o menos del enarenado tradicional en función de la granulometría del enarenado inicial, la intensidad del aporte de restos vegetales y la profundidad de las labores de incorporación de los mismos. En general, hasta ahora no se han observado efectos negativos de esta práctica, pero convendría evaluarla experimentalmente para poder dar recomendaciones sobre su uso en función de las características granulométricas del suelo enarenado. Además, cada vez hay más invernaderos sin enarenado (capa de grava-arena), donde se cultiva directamente sobre el suelo aportado. Estos suelos requieren un manejo del riego distinto a los cultivos en suelos enarenados, con un régimen de riegos muy intenso durante las primeras semanas del cultivo y, una vez superado el periodo de enraizamiento, un manejo que evite problemas de sales o excesos de humedad ambiental. En estos invernaderos es frecuente usar un acolchado con plástico negro para evitar la aparición de malas hierbas.

El uso de materiales plásticos de acolchado puede generar un problema medioambiental si no hay medidas adecuadas para gestionar sus residuos, ya que estos necesitan un elevado número de años para reintegrarse al ecosistema. Los materiales acolchados, una vez concluida su vida útil, pueden ser: retirados para su reciclado a plásticos de menor calidad; incorporados al suelo para su degradación en el mismo; o retirados para llevarlos a plantas de compostaje. Existen diferentes tecnologías para valorizar los acolchados plásticos (de origen fósil) como el reciclado mecánico y el reciclado químico, pero un elevado contenido de elementos impropios en los residuos acolchados (principalmente, tierra y materia orgánica) puede dificultar y encarecer la retirada del acochado para su valorización mecánica o química. Otras vías de gestionar los residuos de acolchados son usar materiales acolchados biodegradables y biodegradables compostables. Los materiales biodegradables permiten incorporarlos después de su uso directamente al suelo, donde se degrada e integra mediante mecanismos naturales (radiación solar, humedad, oxígeno y microorganismos). Esta degradación ocurrirá a distintas velocidades en función de las condiciones del suelo y de que el residuo esté totalmente enterrado o parcialmente expuesto al aire. En cultivos al aire libre la incorporación al suelo de los materiales biodegradables es factible técnicamente y, generalmente, compatible con los ciclos de cultivo. En cultivos en invernadero la incorporación al suelo de acolchados biodegradables para su descomposición se ve limitada por el uso intensivo de ciclos de cultivo que ocupan gran parte del año y por la dificultad en programar su degradación que depende, sobre todo, de las condiciones térmicas y de humedad del suelo. Cuando la degradación completa del acolchado en el suelo no está

Fotografía 4. Cultivos de invernadero en un suelo enarenado con un acolchado de grava-arena y aportes de restos vegetales (arriba) y en un suelo sin acolchado de grava-arena (abajo).

garantizada existe la opción del uso de materiales biodegradables compostables (Biocom), que pueden proceder tanto de fuentes renovables como fuentes fósiles. Estos materiales después de su uso se retiran y se llevan a una planta de compostaje, donde se biodegrada a materia orgánica por los microorganismos. La elección del sistema de gestionar los residuos de acolchado dependerá de criterios económicos y medioambientales en función de la

disponibilidad y proximidad de plantas de reciclado o compostaje, del nivel de impropios en los residuos y del coste de los materiales acolchados.

En cultivos en invernaderos mediterráneos en sustratos la práctica más común es usar sacos o planchas de plástico blanco y negro, con su cara blanca en el exterior. En estos sistemas de cultivo puede ser interesante colocar un acolchado plástico negro alrededor del saco durante los periodos fríos, cuando las temperaturas del sustrato pueden limitar la actividad de las raíces. Para que esta práctica sea viable es necesario un sistema de colocación del plástico sencillo y económico, que permita su fácil retirada.

5. Conclusiones

En invernaderos mediterráneos sin calefacción el acolchado de grava-arena, con respecto a un suelo sin dicho acolchado, aumentó la temperatura del suelo en el periodo frio de los ciclos de cultivo al aumentar la resistencia a la transferencia de energía desde las capas profundas del suelo hacia su superficie, lo que redujo las pérdidas de energía del suelo. Esta mayor temperatura del suelo puede favorecer el crecimiento y la productividad de los cultivos hortícolas en invernaderos mediterráneos, sobre todo, los que inician sus ciclos en el periodo frío de la campaña.

En un invernadero mediterráneo sin calefacción el acolchado de grava-arena de un suelo enarenado aumentó los principales parámetros de crecimiento y productividad de un cultivo de judía de mata baja en ciclos de cultivo en torno al periodo frío, en comparación al cultivo sin dicho acolchado. Estas diferencias fueron debidas a una mayor temperatura del suelo con el acolchado de grava-arena, ya que la radiación incidente, la radiación absorbida y la temperatura del aire que rodeaba a los cultivos fueron similares en los cultivos con y sin acolchado de grava-arena.

En un invernadero mediterráneo sin calefacción el acolchado plástico negro colocado sobre un suelo enarenado durante el periodo frio del año aumentó la temperatura del suelo y la temperatura diurna del aire cercano al suelo, y disminuyó o no afectó a la temperatura nocturna del aire cercano al suelo, en comparación con el acolchado plástico transparente o el suelo enarenado sin acolchado plástico.

En un invernadero mediterráneo sin calefacción el aumento de la temperatura del suelo con acolchado plástico negro, respecto al acolchado plástico transparente o no acolchado plástico, fue debido a: i) una mayor radiación neta diaria disponible dentro del invernadero con plástico negro, especialmente durante el día, causado, principalmente, por el menor albedo de la superficie del acolchado negro; ii) las elevadas temperaturas que se alcanzaron en la superficie del plástico negro, debido, sobre todo, a muy baja velocidad del aire dentro del invernadero, que redujeron el intercambio de calor por convección entre la superficie de plástico y el aire del invernadero.

En un invernadero mediterráneo sin calefacción el uso de un acolchado plástico negro sobre un suelo enarenado en un ciclo de cultivo de otoño-invierno de pepino aumentó el reparto de materia seca a los frutos y la productividad final de frutos totales, comerciales y de primera categoría.

En un invernadero mediterráneo sin calefacción el uso de un acolchado plástico blanco sobre un suelo enarenado en ciclos de cultivos en torno al periodo frío redujo la temperatura del suelo y del sustrato, así como la del aire que rodea a los cultivos, debido a la mayor radiación reflejada por el invernadero con acolchado blanco, lo que redujo la energía disponible dentro del invernadero. Este efecto fue mayor al inicio de los ciclos de cultivo, cuando la cobertura vegetal del suelo era baja.

En cultivos en invernaderos mediterráneos sin calefacción el uso de acolchados plásticos blancos, que redujeron las temperaturas del suelo/sustrato y/o del aire en periodos de cultivo en los que dichas temperaturas fueron sub-óptimas, lo que condujo a menor crecimiento y una menor productividad de los cultivos hortícolas. El aumento de la radiación fotosintéticamente activa que llega al cultivo por la mayor reflexión del acolchado de plástico blanco, solo inducirá un aumento de la radiación absorbida por el cultivo si el índice de área foliar del cultivo no ha sido limitado por las temperaturas sub-óptimas del suelo/sustrato y/o del aire.

Bibliografía

Aubinet, M., Deltour, J., de Halleux, D., Nijskens, J. (1989). Stomatal regulation in greenhouse crops: analysis and simulation. Agricultural and Forest Meteorology 48, 21–44.

Baille, A. (1999). Energy cycle. En Greenhouse Ecosystems. Stanhill, G. and Enoch, H. Z. (eds.). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, p. 265–86.

Berninger E. (1989). Cultures florales de serre en zone mediterraneenne francaise: Elements climatiques et physiologiques. INRA, Paris.

Bonachela, S. Granados, M.R, López, J.C., Hernández, J., Magán, J.J., Baeza, E., Baille, A. (2012). How plastic mulches affect the thermal and radiative microclimate of an unheated low-cost greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology 165, 65–72.

Bonachela, S.B., López, J.C., Granados, M.R., Magán, J.J., Hernández, J., Baille, A. (2020). Effects of gravel mulch on surface energy balance and soil thermal regime in an unheated plastic greenhouse. Biosystems Engineering 192, 1–13.

Bretones, F. (1999). El enarenado. En Técnicas de Producción de Frutas y Hortalizas en los Cultivos Protegidos. F. Camacho (ed.). Instituto La Rural, Vol. I, p. 99–111.

Cadahía, C. (1988). Fertilización en riego por goteo de cultivos hortícolas. ERT Fertilizantes, Unión Explosivos Rio Tinto, Madrid. 234 pp.

Escobar, I. (2004). Acolchado de suelo con plásticos reflectantes en el cultivo de judía de mata baja en invernadero. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Fernández, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R.B., López, J.C., Granados, M.R., Gallardo, M., Fereres, E. (2010). Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. Irrigation Science 28, 497–509.

García, C., Céspedes, A.J, Lorenzo, P., Pérez-Parra, J.J., Escudero, M.C., Medrano, E., Baeza, E., López, J.C., Magán, J.J., Fernández, M.D., Parra, S.,

Gázquez, J.C., García, R., Pérez, C. (2016). El sistema de producción hortícola de la provincia de Almería. M.C. García; A. J. Céspedes; J.J. Pérez-Parra; P. Lorenzo (eds.). Ed. IFAPA. 180 pp.

Giménez, C., Otto, R. F., Castilla, N. (2002). Productivity of leaf and root vegetable crops under direct cover. Scientia Horticulturae 94, 1–11.

Ham, J.M., Kluitenberg, G.J., Lamont, W.J. (1993). Optical properties of plastic mulches affect the field temperature regime. Journal of the American Society of Horticultural Science 118(2), 188–193.

Hernández, J., Escobar, I., Soriano, M.T., Morales, M.I., Hita, O., Romacho, I., Castilla, N. 2005. Efecto de acolchados plásticos reflectantes en el cultivo de judía de mata baja en invernadero. V Congresso Ibérico de Ciências Hortícolas, IV Congresso Iberoamericano de Ciências Hortícolas. Vol. 1, p. 169-174.

Li, X. (2003). Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid region of northwest China. Catena 52, 105–127.

Kader, M.A., Senge, M., Mojid, M.A., Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. Review. Soil and Tillage Research 168, 155–166.

Li, X.Y. (2003). Gravel–sand mulch for soil and water conservation in the semiarid region of northwest China. Catena 52, 105–127.

Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Soriano, T., Castilla, N. (2005). Responses of cucumbers to mulching in an unheated plastic greenhouse. Journal of Horticulture Science and Technology 80, 11–17.

Nisen, A., Grafiadellis, M., Jiménez, R., La Malfa G., Martínez-García, P.F., Monteiro, A., Verlodt, H., Villele, O., Zabeltitz, C.H., Denis, J.C., Baudoin, W., Garnaud, J.C. (1988).Cultures protegees en climat mediterraneen. F.A.O., Rome.

Rosenberg, N.J., Blad, B.L., Verma, S.B. (1983). Microclimate: The biological environment. John Wiley & Sons.New York.

Stapleton, J.J. (2000). Soil solarization in various agricultural production systems. Crop Protection 19, 837–841.

Toki, T., Ogiwara, S., Aoki, H. (1978). Effect of varying night temperature on the growth and yield of cucumber. Acta Horticulturae 87, 233–7.

Dobles techos

Juan Carlos López[1], Santiago Bonachela[1], María Rosa Granados[2], Francisco José Salvador Sola[3].

[1]Universidad de Almería

[2]IFAPA “La Mojonera”

[3]Hortalan Med S.L.

1. Descripción y materiales

El doble techo fijo es un sistema de calefacción pasivo que se ha extendido con distintas variantes en los invernaderos del litoral de Almería. Consiste, básicamente, en láminas plásticas semitransparentes colocadas de manera permanente, día y noche, entre la cubierta del invernadero y el cultivo (Hernández y col., 2017), dividiendo el volumen del invernadero en dos cámaras, una inferior donde se desarrolla el cultivo y otra superior sin cultivo. El doble techo fijo está formado, habitualmente, por capillas con la misma orientación que las capillas o módulos del invernadero y se instala con una pendiente y tensión adecuada para permitir retirar el agua de condensación o lluvia hacia zonas libres de cultivo (pasillos entre líneas de plantas), y evitar la formación de bolsas de agua que puedan romperlo (Fig. 1). Es una técnica que puede combinarse con otras técnicas de calefacción pasivas, como acolchado, mangas de agua, doble plástico inflado o cortinas plásticas, y no dificulta el acceso de los trabajadores a las plantas.

Este sistema se usa, principalmente, para: i) aumentar la temperatura del aire que rodea al cultivo para mejorar su desarrollo y crecimiento; y ii) evitar la caída del agua de lluvia (invernaderos parrales) y condensación (cara interna de la cubierta del invernadero y del doble techo) sobre el cultivo, reduciendo el desarrollo de enfermedades (hongos y bacterias) y los daños por fisiopatías (Baptista, 2007; Salvador Sola, 2015; Hernández y col., 2017). El doble techo fijo mejora el balance térmico del invernadero aumentando el calor acumulado durante el día y reduciendo las pérdidas durante la noche, siendo necesario gestionarlo mediante la ventilación diurna para permitir una adecuada actividad de la planta y limitar la aparición de problemas por enfermedades (Salvador Sola, 2015). En función del clima, cultivo y estructura del invernadero, el doble techo fijo se puede confeccionar con un grado de hermeticidad diferente para permitir

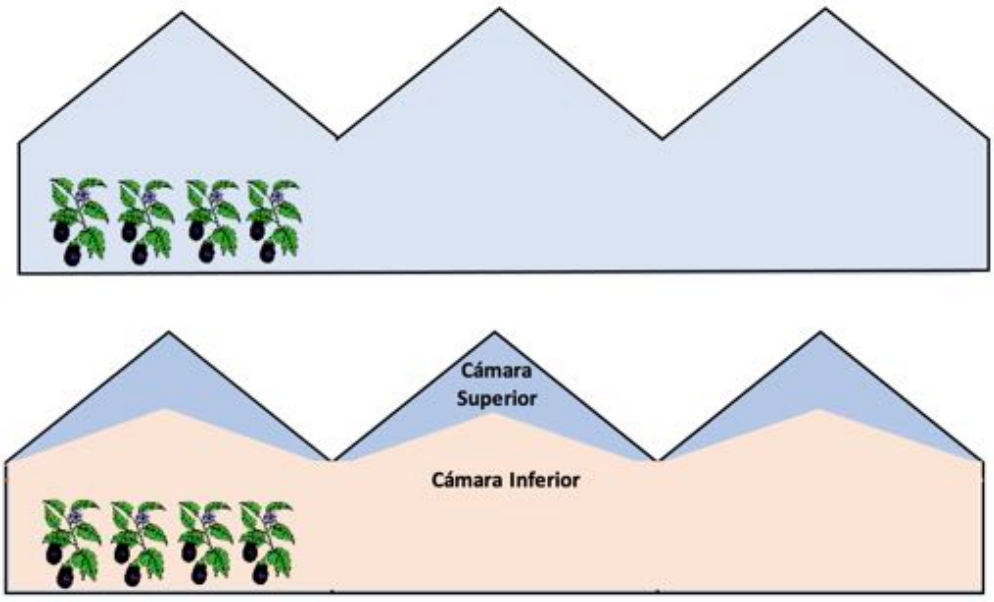
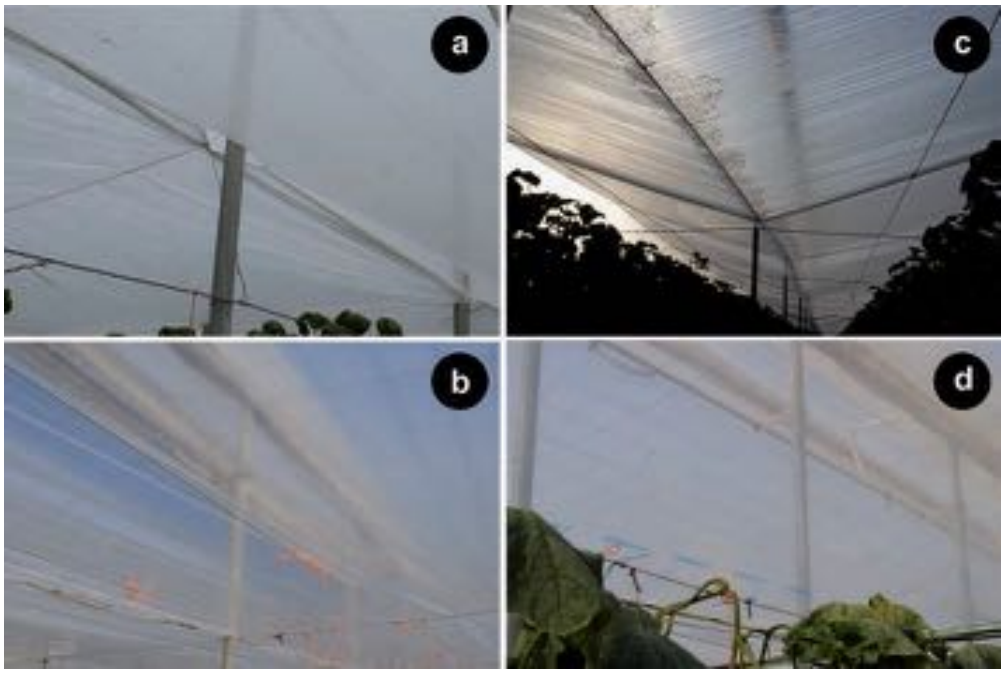


Figura 1. Esquema de un invernadero sin doble techo (superior) y con doble techo (inferior).

el movimiento del aire caliente y húmedo de la cámara inferior del invernadero hacia la cámara superior y renovar el aire evitando humedades y temperaturas excesivas para los cultivos.

Para reducir el impacto negativo que tienen los dobles techos fijos de plástico sobre el clima, al reducir la radiación solar y la ventilación del invernadero durante las horas de luz, han sido desarrollados algunos prototipos de dobles techos móviles con láminas plásticas que permiten ser extendidos por la noche y recogidos durante el día de forma manual o automatizada, aunque su uso no se ha extendido.

La construcción del doble techo fijo precisa, fundamentalmente, de láminas plásticas semitransparentes flexibles y alambres para soportarlas y fijarlas. En el mercado podemos encontrar diferentes materiales plásticos para los dobles techos fijos (Fotografía 1), siendo los más utilizados:



Fotografía 1. Materiales utilizados en el doble techo: a) manta térmica, b) plástico térmico, c) plástico térmico y antigoteo y d) plástico antigoteo de alta trasparencia.

a) Láminas de coextrusión multicapa fabricadas en base a metalocenos denominadas también de alta transparencia con efecto antigoteo y con espesores a partir de 37,5 μm. Presentan una elevada transmisividad a la luz visible y una baja difusión (% de luz transmitida con un ángulo mayor a 2,5º con respecto al ángulo de incidencia), con valores de 97% y 8%, respectivamente (datos de la empresa Sotrafa). Dada su alta transmisividad y elevado porcentaje de radiación directa se debe tener precaución en días despejados para evitar daños en el cultivo por exceso de temperatura.

b) Láminas de coextrusión multicapas en base a copolímero de etileno y acetato de vinilo (EVA) y/o copolímero de etileno y acrilato de butilo (EBA) con opción de incorporar efecto térmico y efecto antigoteo, y con espesores a partir de 37,5 μm. La transmisividad a la radiación solar de estos plásticos es algo inferior a la de los plásticos a base de metalocenos y la

difusión es algo mayor. Datos de la empresa Sotrafa muestran una transmisividad del 93% si son térmicos y del 94% si son no térmicos, y una difusión de 16% para el térmico y del 14% para el no térmico.

c) La manta térmica es poco utilizada como doble techo, pero algunos agricultores la usan, sobre todo, por su efecto barrera frente a plagas, ya que su efecto térmico, al ser porosa, es menor al de los materiales plásticos. La manta térmica presenta menor transmisividad a la radiación solar que las láminas plásticas, lo que puede ser un limitante para el crecimiento de los cultivos. La manta térmica puede retener, parcialmente, el agua que gotea del techo del invernadero evitando que caiga sobre el cultivo, pero en periodos de lluvia en invernaderos tipo parral, puede saturarse y comenzar a gotear, por lo que precisa de invernaderos con buena ventilación.

Las láminas plásticas de los dobles techos fijos son menos eficaces que las pantallas aluminizadas frente a las pérdidas nocturnas de energía por radiación de onda larga (el aluminio refleja la radiación y el plástico la absorbe y/o transmite), pero aumentan la hermeticidad del doble techo (la pantalla aluminizada es de tejido cosido) y reducen las pérdidas convectivas.

En el material plástico del doble techo se pueden formar gotas de condensación que reducen la transmisividad de la radiación solar y pueden caer sobre el cultivo. Para evitarlo es posible incorporar en las láminas plásticas aditivos antigoteo que facilitan que el agua condensada forme una lámina, escurra y pueda ser retirada cuando el doble techo presente una pendiente adecuada. Si el doble techo fijo dispone de pequeñas canaletas en los amagados o bajantes (parte inferior de las capillas) el agua recogida se puede retirar fuera del invernadero y reducir la humedad en la zona de cultivo; si no dispone de canaletas, el agua debe verterse dentro del invernadero en zonas libres de plantas (entre líneas de cultivo). El uso de plástico antigoteo permite instalar dobles techos fijos más herméticos al poder retirar gran parte de la condensación que se produce en la cara interna del mismo y evitar el goteo sobre el cultivo, siendo los plásticos antigoteo los más utilizados en ciclos de cultivo tardíos en invernaderos con poca ventilación o en cultivos con calefacción.

El coste del doble techo fijo es muy inferior a otros sistemas de calefacción pasivos como las pantallas térmicas, siendo además muy eficaz para evitar la caída de agua sobre el cultivo. En la actualidad, el uso de doble techo fijo es una técnica extendida en todo el litoral de Almería, sobre todo, en ciclos de cultivos con altos riesgos de enfermedades fúngicas, como los ciclos de pepino en periodos fríos del año (Hernández y col., 2017). Se estiman unos costes medios para un doble techo de 0,35 a 0,50 € m^{-2}, según el tipo de doble techo, en la estructura de alambres para soportar la lámina plástica, que podrá ser reutilizada las siguientes campañas; y de 0,23 € m^{-2} en las láminas de plástico (espesor habitual de 37,5 μm), que deben de soportar tensión y durar todo el ciclo de cultivo (Salvador Sola, 2015).

A pesar del amplio uso de los dobles techos fijos apenas hay información cuantitativa sobre sus características, utilización, clima generado, incidencia sobre enfermedades y respuesta

agronómica, siendo necesaria para su mejora futura.

2. Tipos y usos

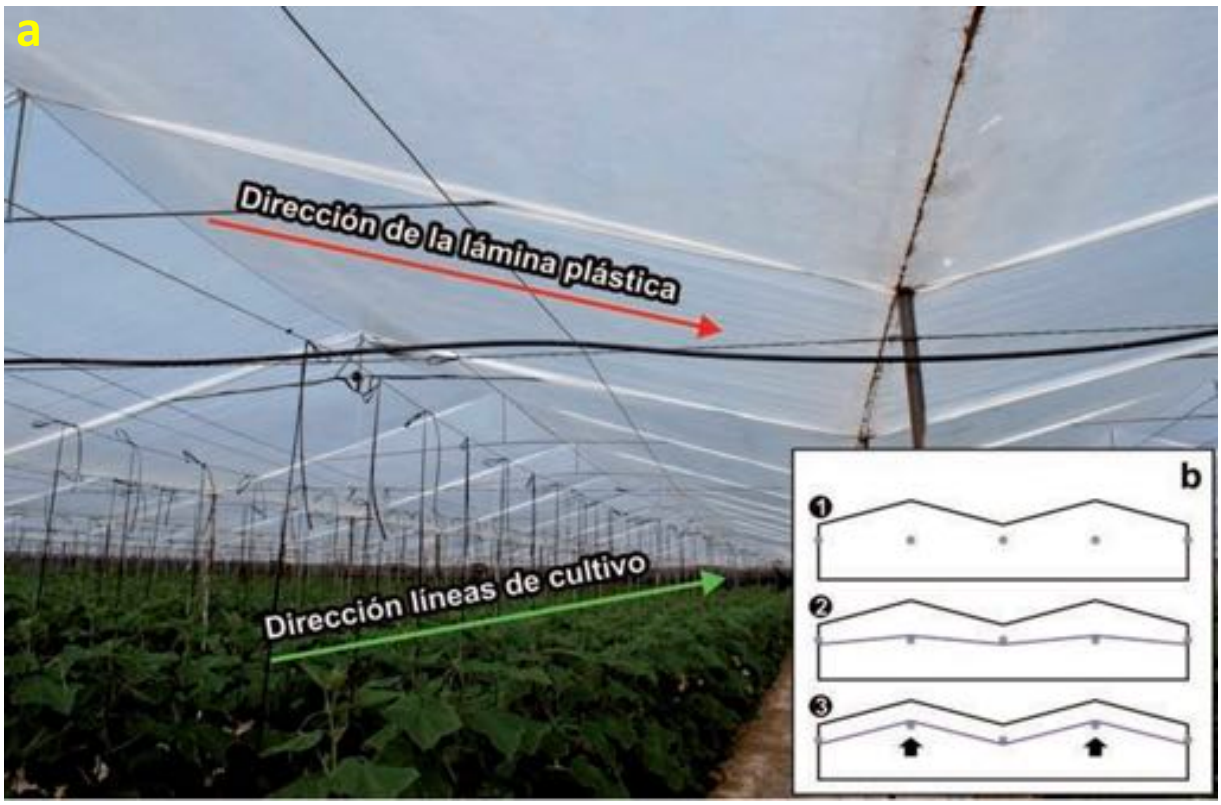
En los invernaderos del litoral de Almería se instalan diferentes tipos de dobles techos fijos según las características de los invernaderos y necesidades de los ciclos de cultivos. Un factor que condiciona el tipo de doble techo fijo a instalar es la disposición de sus láminas plásticas. Según se extiendan las láminas plásticas, perpendiculares o paralelas a las líneas de cultivo, van a determinar la hermeticidad del doble techo, el clima generado y el momento de instalarlas según el ciclo de cultivo.

A continuación, se describen los principales tipos de dobles techos fijos que se instalan en los invernaderos de Almería, donde la orientación predominante de las capillas de los invernaderos es la Norte-Sur, con líneas de cultivo paralelas al eje del invernadero (García y col., 2016).

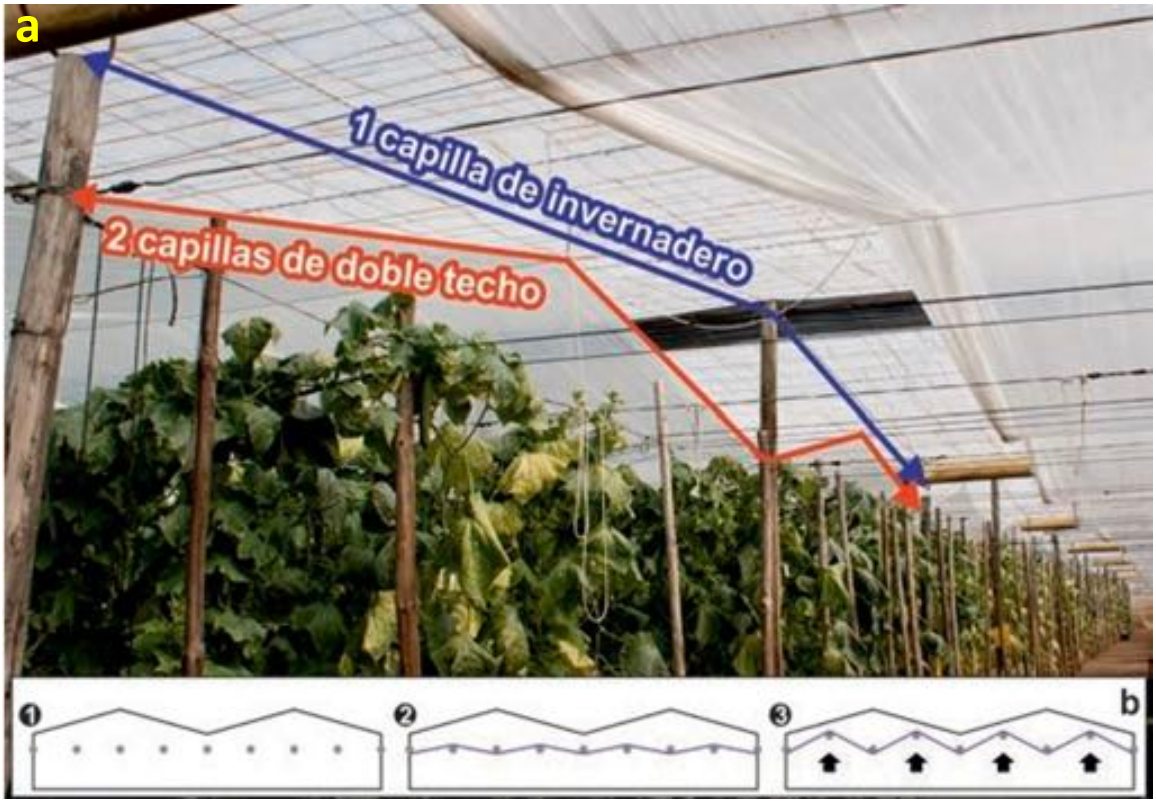
2.1. Fijo con láminas extendidas perpendicularmente a las líneas de cultivo

Este doble techo también se denomina en Almería doble techo Poniente-Levante porque las láminas plásticas del doble techo se extienden perpendiculares a las capillas y líneas de cultivo, que están orientadas, habitualmente, Norte-Sur (Salvador Sola, 2015). Dado que las láminas plásticas se extienden perpendiculares a las líneas de cultivo, para evitar la caída de agua sobre las plantas, es necesario unir las láminas entre sí haciendo que el doble techo sea hermético. Debajo de cada capilla del invernadero se instala una capilla de doble techo fijo ambas con los ejes paralelos, donde las láminas de plástico se extienden perpendiculares al eje del invernadero y a las líneas de cultivo (Fotografía 2). Los alambres de sujeción se colocan paralelos a la dirección del eje del invernadero, bajo las raspas o cumbreras (parte superior de la capilla del invernadero) y los amagados o bajantes (parte inferior de la capilla del invernadero). Los alambres bajo el amagado se fijan a la altura deseada y los de las raspas se dejan libres. Las láminas plásticas se extienden perpendicularmente a estos alambres, pasándolas por encima de los alambres libres situados bajo las raspas y por debajo de los fijos situados bajo los amagados. Una vez que todas las láminas plásticas están extendidas, se levantan los alambres libres tensándolos mediante cuerdas o sujetándolos en ganchos metálicos dispuestos en los pilares de la raspa. Este doble techo es el más económico por requerir menos material de construcción (alambre) y menos horas de mano de obra para su instalación. Suele colocarse antes de sembrar/plantar el cultivo, siendo difícil su instalación con el cultivo desarrollado porque las láminas plásticas deben extenderse cruzando las líneas de cultivo.

Una variante de este tipo de doble techo es el doble techo estrecho con láminas plásticas extendidas perpendicularmente a las líneas de cultivo. En ella, se instalan dos capillas de doble techo bajo cada capilla de invernadero (Fotografía 3), lo que requiere doble cantidad de alambres fijos y móviles. Esta variante reduce el



Fotografía 2. a) Doble techo con láminas plásticas extendidas perpendiculares a las líneas de cultivo. b) Esquema de: 1) colocación de los alambres; 2) colocación de las láminas plásticas; y 3) elevación de los alambres libres bajo las raspas.



Fotografía 3. a) Doble techo estrecho con láminas plásticas extendidas perpendicularmente a las líneas de cultivo. b) Esquema de: 1) colocación de los alambres; 2) colocación de las tiras plásticas; y 3) elevación de los alambres libres bajo las raspas.

volumen de aire de la cámara inferior y aumenta el efecto térmico nocturno, aunque puede incrementar el riesgo de que el cultivo sufra valores elevados de humedad y temperatura del aire.

En estos dos dobles techos fijos, de capilla simple o doble, las uniones de las láminas plásticas contiguas están sobre el cultivo, por lo que deben unirse herméticamente entre sí con lañas de alambre para evitar la caída de agua sobre las plantas (Fotografía 4). La retirada del agua que cae sobre el doble techo procedente de la condensación en la cubierta del invernadero y de la entrada de lluvia, se realiza abriendo pequeños agujeros en la parte inferior de la capilla del doble techo (Fotografía 4), que deben verter el agua en los pasillos entre las líneas de plantas o recogerla con canaletas. La alta hermeticidad de estos dobles techos mejora la temperatura nocturna del aire entre 2 y 4 ºC frente a un invernadero sin doble techo (Salvador Sola,

Fotografía 4. Detalle de las lañas que unen las láminas plásticas en un doble techo fijo con las láminas perpendiculares a las líneas de cultivo (izquierda) y de los agujeros realizados en el amagado para evacuar del agua (derecha).

2015), pero reduce mucho la ventilación y aumenta el riesgo de condensación de agua en la cara interna del doble techo. Se puede mejorar la ventilación del invernadero abriendo el doble techo en los pasillos del invernadero (Fotografía 5), aunque es laborioso, aumenta el coste y, dependiendo del invernadero, puede ser insuficiente para evitar goteos de agua. Estos dobles techos suelen instalarse en ciclos de cultivo de pepino tardío y extra-tardío (trasplantes en octubre y noviembre), donde apenas hay riesgos de excesos térmicos al inicio del cultivo. En estos ciclos el doble techo se instala antes de plantar y cuando aumenta el crecimiento vegetativo del cultivo puede ser necesario ventilar la cámara inferior para evitar humedades excesivas y condensaciones bajo el doble techo. Estos dobles techos también pueden ser adecuados para ciclos extra-tempranos de tomate y pepino en ciclos de primavera (trasplante de diciembre y enero), pero en estos ciclos será necesario retirar el doble techo a finales del invierno para evitar temperaturas y humedades excesivas en primavera. En ciclos de pimiento su uso dependerá en gran medida de la fecha de plantación, pues en trasplantes de finales de octubre o primeros de noviembre las temperaturas aún pueden ser elevadas.

Fotografía 5. Distintas formas de mejorar la ventilación del invernadero abriendo el doble techo en los pasillos: a) lámina plástica sobre el pasillo que puede recogerse manualmente; b) manta térmica sobre el pasillo; c) cortinas plásticas verticales en los pasillos; y d) lámina plástica sobre el pasillo que puede recogerse de forma automática y sincronizada con las ventanas cenitales automatizadas.

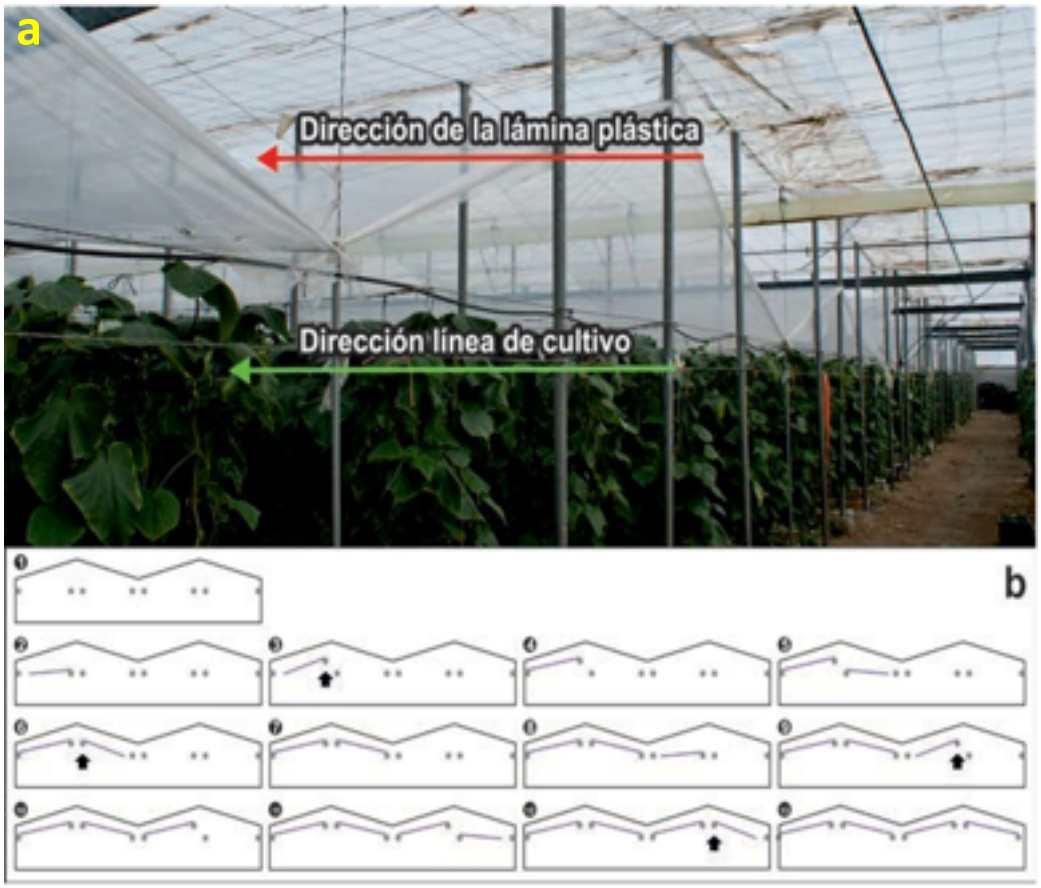
Fotografía 6. Doble techo en escalón con láminas perpendiculares a las líneas de cultivo y separadas verticalmente.

El doble techo en escalón es otra variante que consiste en extender las láminas perpendicularmente al eje del invernadero formando capillas, como en las variantes anteriores, pero colocadas a distintas alturas para dejar una separación vertical entre ellas (Fotografía 6), que facilite el flujo y renovación de aire entre la cámara inferior, la superior y las ventanas. Esto implica colocar un alambre extra en cada cumbrera del doble techo.

2.2. Fijo con láminas plásticas extendidas paralelamente a las líneas de cultivo.

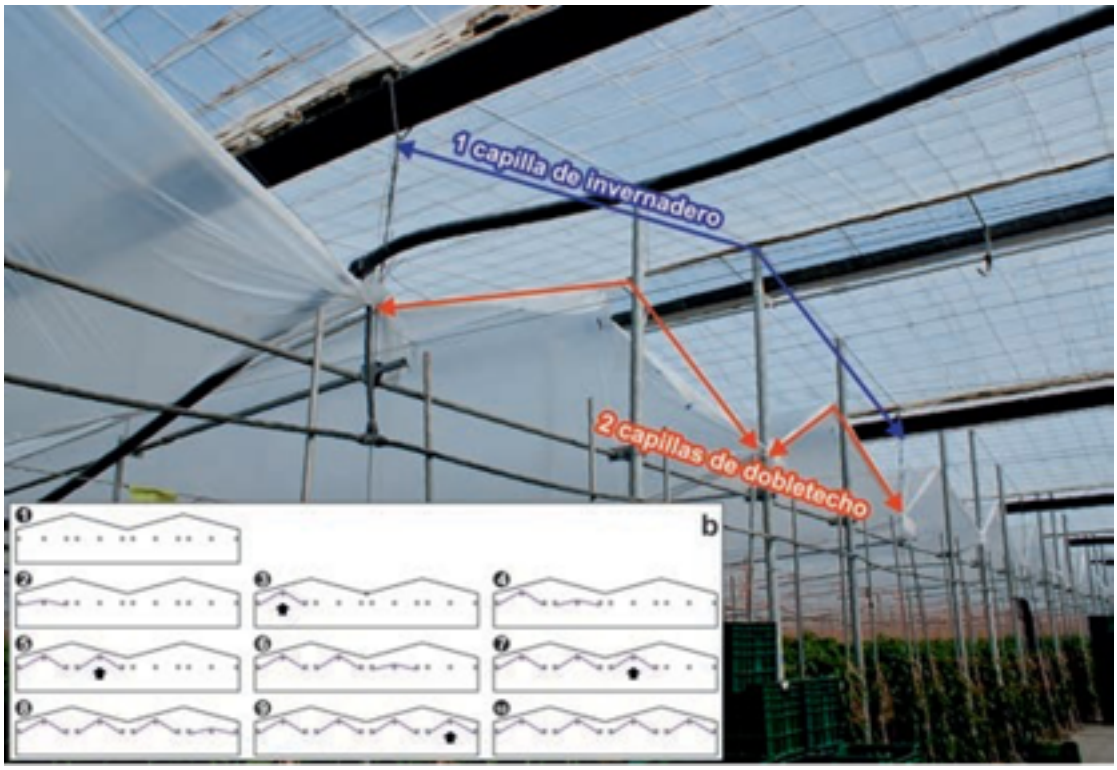
Este doble techo fijo también se denomina en Almería doble techo Norte-Sur, porque sus láminas plásticas se extienden paralelas a las capillas y líneas de cultivo que están orientadas, habitualmente, Norte-Sur (Salvador Sola, 2015). Como se extienden paralelas a las líneas de cultivo, las láminas plásticas se deben juntar entre las líneas de plantas para evitar la caída de agua sobre las mismas, no siendo necesario unirlas entre sí y quedando menos hermético el doble techo. Debajo de cada capilla del invernadero se instala una capilla de doble techo fijo con las láminas de plástico extendidas paralelas al eje del invernadero y a las líneas de cultivo. Se instalan dos alambres fijos bajo cada amagado y dos alambres libres bajo cada raspa del invernadero, todos paralelos a las líneas de cultivo. Primero, las láminas se fijan a los alambres libres de la raspa con lañas de alambre y se elevan a su posición definitiva mediante cuerdas o ganchos metálicos. Posteriormente, las láminas se fijan a los alambres fijos del amagado con una tensión y pendiente suficiente para que puedan evacuar el agua de condensación y de lluvia (Fotografía 7). En este doble techo las láminas de plástico contiguas no se suelen unir, por lo que presenta pequeñas aberturas en las raspas y amagados (Fotografía 8). Ello permite el intercambio de aire entre la cámara inferior y la superior, lo que reduce o evita el riego de condensación, pero limita el efecto térmico: aumentos de temperatura nocturna del aire de 1 a 2ºC, respecto al no doble techo (Salvador Sola, 2015). Este doble techo puede hacerse más hermético cubriendo los pasillos y uniendo las láminas de plástico contiguas con lañas de alambre, pero lo último no es frecuente. Las uniones de las láminas de plástico contiguas se deben localizar sobre zonas sin cultivo, entre pasillos, para permitir que el agua de condensación y lluvia se vierta directamente al suelo. La instalación puede realizarse con el cultivo desarrollado, al no precisar cruzar las líneas de cultivo para extender las láminas. Es muy utilizado en ciclos de pepino medios (plantación de septiembre), donde se inicia el cultivo sin doble techo y se coloca a finales de octubre o primeros de noviembre para evitar temperaturas elevadas. Se puede adaptar también a cualquier cultivo o ciclo en el que se necesite trasplantar con el invernadero blanqueado y disponer un doble techo con cierto efecto térmico una vez se elimine el sombreo.

Una variante es el doble techo fijo estrecho con las láminas extendidas paralelas a las líneas de cultivo, formando dos capillas de doble techo por cada capilla de invernadero (Fotografía 9). Esta



Fotografía 7. a) Doble techo con las láminas de plástico extendidas paralelamente a las líneas de cultivo. b) Esquema de: 1) colocación de los alambres; 2) extensión de las láminas plásticas, fijándolas al alambre libre bajo la raspa; 3) el alambre libre se eleva; 4) el otro extremo de la lámina plástica se fija al alambre fijo bajo el amagado; 5) a 13) se repite quedando el doble techo abierto en las raspas y en los amagados.

Fotografía 8. Aperturas entre las láminas plásticas en un doble techo con láminas plásticas paralelas a las líneas de cultivo.



Fotografía 9. a) Doble techo estrecho con láminas plásticas paralelas a las líneas de cultivo de pimiento de otoño. b) Esquema de: 1) colocación de los alambres; 2) colocación de las láminas plásticas; 3) elevación del alambre libre; 4) a 10) se repite, quedando abierto en los amagados

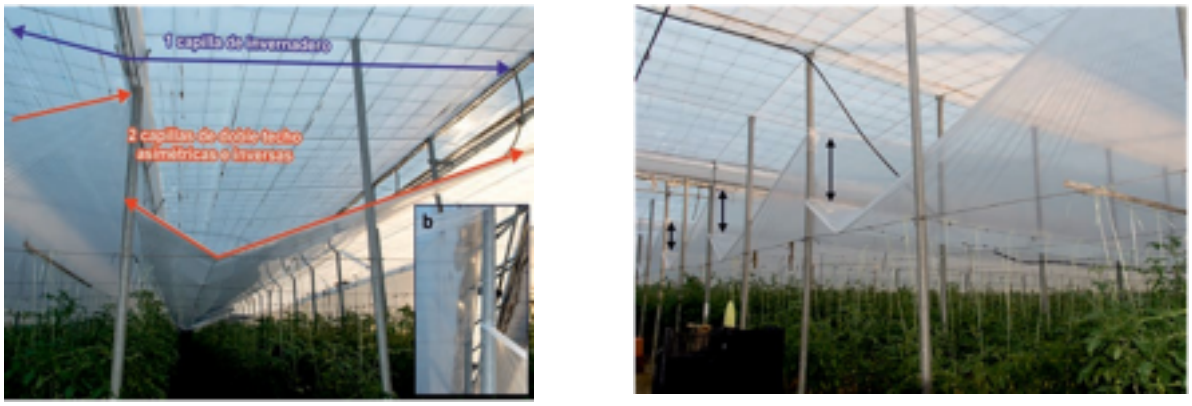
variante permite dejar una mayor separación entre las láminas plásticas contiguas (dependiendo del marco de plantación del cultivo) y formar capillas con mayor pendiente, lo que mejora la ventilación del invernadero y evita la caída de agua al cultivo, aunque el aumento de la temperatura nocturna que se consigue es pequeño (Fotografía 10). Una ventaja de esta variante de doble techo es su adaptabilidad a invernaderos planos y bajos, donde la doble capilla permite alcanzar suficiente pendiente para retirar el agua. Es posible hacerlo más hermético al inicio del cultivo uniendo con lañas de alambre las láminas plásticas contiguas, ganando efecto térmico nocturno, y, una vez pasada la época más fría, retirar las lañas y separar las láminas aumentando la ventilación, pero manteniendo el cultivo protegido de la caída de agua. Es apropiado en cultivos con mayores necesidades de ventilación en ciclos de otoño (pimiento, tomate o berenjena) para mantener la planta seca y prevenir enfermedades y fisiopatías.

Una variante muy utilizada en los cultivos ecológicos es el doble techo asimétrico, donde las láminas plásticas se extienden paralelas a las líneas de cultivo, de forma que la separación entre las láminas es muy grande y el intercambio de aire entre las dos cámaras del doble techo es máximo (Fotografía 11). El efecto térmico es casi nulo, pero este doble techo evita el goteo de agua sobre el cultivo.

El doble techo asimétrico invertido es otra variante con las láminas de plástico extendidas paralelas al eje del invernadero y a las líneas de plantas, formando capillas de diferente ancho e inclinación (Fotografía 12). En esta variante hay una

Fotografía 10. Doble techo estrecho con láminas plásticas paralelas a las líneas de cultivo y separadas entre sí sobre un cultivo de tomate de otoño

Fotografía 11. Doble techo asimétrico en un cultivo de pepino ecológico.



Fotografía 12. Doble techo asimétrico invertido con láminas plásticas paralelas a las líneas de cultivo en un cultivo de tomate de ciclo largo.

amplia separación vertical entre láminas contiguas, lo que facilita el intercambio de aire entre la cámara inferior y la superior, y su renovación por las ventanas cenitales. Se instala un tercer alambre en cada lámina que da forma de doble techo invertido y permite retirar el agua del goteo lejos de las plantas. Se utilizan en cultivos donde se quiere evitar la caída de agua a las plantas sin apenas limitar la ventilación de la cámara inferior. En este doble techo el riesgo de condensación en la cámara inferior es bajo, lo que permite ajustar la ventilación del invernadero y trabajar con humedades altas, manteniendo seco el cultivo, pero con un escaso incremento térmico nocturno. Es el doble techo más indicado en cultivos ecológicos o en cultivos de tomate de ciclo largo con deshojados frecuentes, donde es preciso mantener seco al cultivo para prevenir problemas fúngicos.

2.3. Otros dobles techos

El doble techo fijo plano solo se instala en invernaderos altos con un buen sistema de ventilación que impida que se condense agua en las superficies plásticas de la doble cámara. La lámina plástica debe estar perforada para evitar su hundimiento en periodos de lluvia, lo que aumenta el riesgo de enfermedades al poder caer agua sobre el cultivo. Como ventaja, mencionar que la lámina perforada ayuda a mejorar la recirculación del aire entre las dos cámaras.

En algunos invernaderos localizados en zonas frías de la comarca del "Campo de Dalías" de Almería, los agricultores instalan dos dobles techos fijos de plástico por encima de la cubierta vegetal durante el periodo frío de ciclos extra-tempranos o extra-tardíos (siembras/trasplantes a finales de noviembre, diciembre y enero) de cultivos como el pimiento. En estos invernaderos, además del doble techo común situado entre el techo del invernadero y el emparrillado de alambre de tutorado, se colocan láminas plásticas horizontales unidas entre sí y apoyadas directamente sobre el emparrillado de alambre (Fotografía 13). Estas láminas suelen estar ligeramente perforadas para que no se acumule el agua de lluvia o condensación. Además, en el doble techo más bajo se suelen colocar láminas plásticas verticales (denominadas cortinas verticales), normalmente, en los pasillos del invernadero para mejorar las condiciones térmicas e higrométricas del cultivo. Estas cortinas se abren manualmente durante el periodo cálido

Fotografía 13. Cultivo de pimiento trasplantado a finales de noviembre en un invernadero parral con dos dobles techos de plástico y cortinas verticales en los pasillos.

del día para evitar excesos térmicos e higrométricos (fotografía 13).

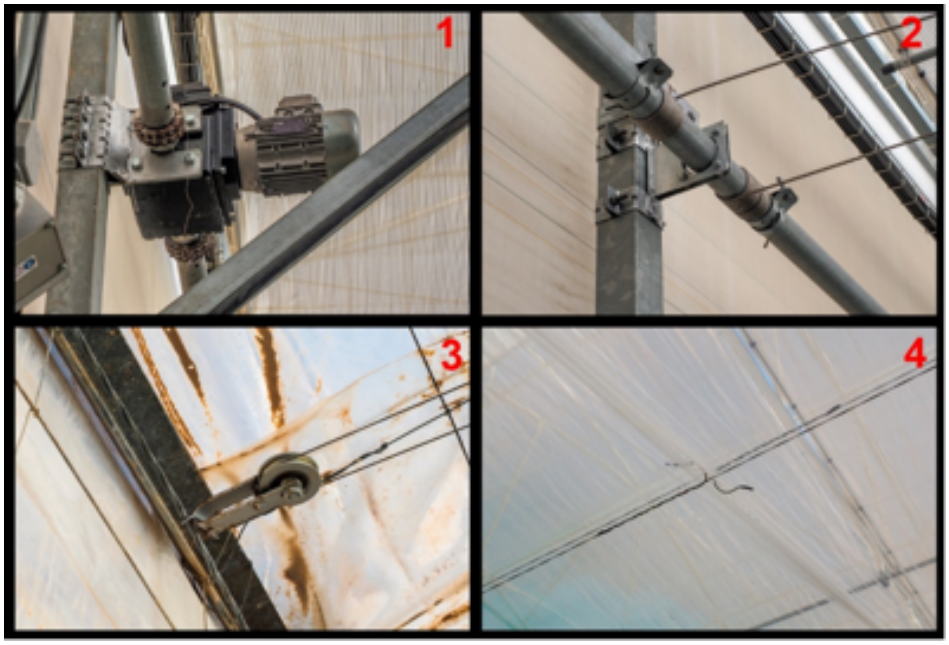
En general, los dobles techos fijos, al estar extendidos durante todo el día, reducen la radiación solar que llega al cultivo y la ventilación del invernadero durante el periodo diurno, lo que puede afectar negativamente al cultivo. Para mitigar estos efectos adversos se han desarrollado algunos prototipos de dobles techos móviles con láminas plásticas semitransparentes e impermeables, que son, normalmente, extendidos por la noche y recogidos durante el día de forma manual o automatizada. Se tratan de prototipos que han desarrollado e implementado agricultores, técnicos y/o grupos de investigación, aunque no se han extendido ni comercializado en la zona:

a) Se ha desarrollado un doble techo móvil (Andrés García, Multinatura S.L) cuyas láminas plásticas, paralelas a las líneas de cultivo, se recogen cuando las ventanas cenitales se abren (las cremalleras tiran hacia arriba de un alambre móvil) y se extienden cuando las ventanas se cierran (unos contrapesos tiran hacia abajo del alambre móvil y las láminas se extienden). Es un sistema sencillo y económico, pero en los días lluviosos o con fuertes vientos, cuando las ventanas no pueden abrirse, el doble techo permanece extendido con el consiguiente riesgo de temperaturas y humedades excesivas.

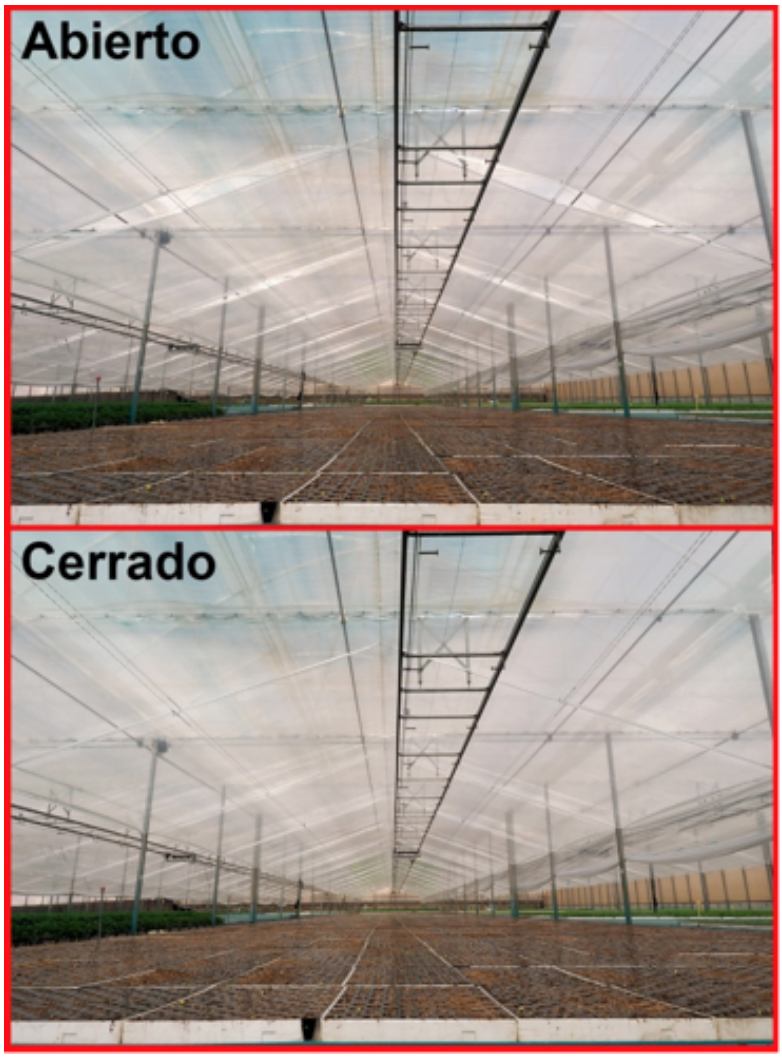
b) El semillero Loteplant S.L. ha desarrollado otra variante del doble techo móvil basado en el funcionamiento del toldo. Una barra de enrollado se desplaza a lo largo de unas guías permitiendo la extensión (desenrollado) y la recogida (enrollado) de las láminas plásticas. Este sistema tiene mayor coste que los dobles techos fijos, ya que requiere una mayor inversión para las guías metálicas, el sistema de enrollado y un plástico de mayor grosor (62,5 μm), y tiene mayores costes de instalación y mano de obra.

c) Investigadores de la Universidad de Almería y la Estación Experimental de la Fundación Cajamar (proyecto nacional "Mejora de la eficiencia energética y del control de la humedad ambiental en los invernaderos del litoral mediterráneo"), han desarrollado y evaluado otra variante de doble techo móvil plegable. En cada capilla del invernadero, las láminas de polietileno forman una capilla de techo simétrico (Hernández y col., 2017) con una pendiente de 9º por encima del cultivo (Fotografía 16). Las láminas de plástico de 200 μm de espesor (Plastermic 3C, Sotrafa, Almería, España) estaban unidas mediante pinzas a unos cables tensados, arrastrados mediante poleas frontales con un motor, que permitía la extensión y la recogida (mediante plegado del plástico) automatizada de las mismas.

d) La variante más extendida de doble techo móvil en el litoral de Almería consiste en un doble techo con las láminas plásticas extendidas perpendicularmente a las líneas de cultivo y unidas entre sí solo en las cumbreras y en los amagados, que pueden abrirse (recogerse) parcialmente. En cada capilla de este doble techo se disponen dos cables o alambres situados perpendicularmente a las láminas plásticas entre el amagado y la cumbrera de cada capilla. Cada uno de estos cables/alambres, que comienza y termina en una barra de mando motorizada, cruza por debajo y por encima de todas las láminas plásticas del doble techo pasando por una polea (Fotografía 14). Los cables/alambres llevan unos ganchos a la altura de los bordes de las láminas



Fotografía 14. Elementos del sistema de doble techo móvil con apertura en diamante.



Fotografía *15. Sistema de doble techo móvil con apertura parcial abierto y cerrado.*

contiguas, de manera que al accionar la barra de mando los ganchos separan las láminas plásticas, creando aperturas del doble techo en forma de rombos por toda la superficie del invernadero. Al accionar la barra de mando en sentido contrario la elasticidad de la lámina plástica cierra el doble techo (Fotografía 14).

Este sistema puede abrir entre un 10-15% de la superficie total del doble techo. Aunque pueda parecer un porcentaje bajo, el gran número de aperturas permite la rápida evacuación del aire caliente y húmedo de la cámara inferior durante el día (Fotografía 15). Para su adecuado funcionamiento es necesario que el invernadero tenga una altura considerable y/o apoyo de calefacción.

3. Microclima en invernaderos con dobles techos

El uso de un doble techo afecta a los flujos de energía y masa dentro del invernadero modificando su microclima, principalmente, la temperatura, la humedad y la concentración de CO_2 del aire, y la radiación que llega al cultivo. El doble techo fijo reduce las pérdidas de energía que se producen a través de la cubierta del invernadero y las pérdidas convectivas que se producen a través de las ventanas y los huecos del invernadero,

pero también reduce la entrada de radiación solar al cultivo. Durante el periodo diurno, el uso de un doble techo fijo en un invernadero mediterráneo, en general, aumenta la temperatura y la humedad absoluta, reduce la concentración de CO_2 del aire cercano al cultivo y reduce la radiación solar que llega al cultivo; mientras que durante el periodo nocturno aumenta la temperatura y la humedad absoluta del aire cercano al cultivo, y reduce las pérdidas de radiación de onda larga o térmica.

A pesar de su extendido uso, la información disponible sobre el microclima en invernaderos con dobles techos fijos es escasa.

A continuación, se describen ensayos (López y col., 2003; Hernández y col., 2017) realizados en invernaderos de la Fundación Cajamar en Almería en los que se midió el microclima generado por los distintos tipos de dobles techos:

a) ciclo de pepino de otoño (agosto-noviembre 2009) en dos invernaderos multitúnel idénticos, uno con y otro sin doble techo móvil de plástico.

b) ciclo de melón temprano (enero-mayo 2010) en dos invernaderos multitúnel idénticos, uno con y otro sin doble techo móvil de plástico.

c) ciclo de pepino tardío o de invierno (octubre 2010-marzo 2011) en dos invernaderos multitúnel idénticos, uno con doble techo fijo de plástico y otro con doble techo móvil.

d) ciclo de pepino de otoño (septiembre 2000-febrero 2001) en dos invernaderos idénticos tipo parral, uno con doble techo fijo de manta térmica (de 17g m^{-2}) y otro sin doble techo.

En los ensayos realizados en los invernaderos multitúnel el doble techo fijo de plástico se construyó siguiendo las prácticas locales (Fotografía 16), con láminas de plástico muy transmisivas e impermeables de 37,5 μm de espesor orientadas norte-sur, formando capillas simétricas con una pendiente de 9º por encima del cultivo (entre 2,20 y 2,80 m de altura) y unidas herméticamente con alambres (Hernández y col., 2017). El doble techo móvil de plástico plegable era un prototipo experimental desarrollado por investigadores de la Universidad de Almería y la Fundación Cajamar (Fotografía 16) y descrito en el apartado 2.3. Este doble techo móvil se extendía cuando la radiación solar exterior era inferior a 50 W m^{-2} (Dieleman y Kempkes, 2006) y la temperatura del aire del invernadero era inferior a 18ºC, por lo que, en general, durante el periodo frio del ciclo de cultivo se mantenía extendido durante todo el periodo nocturno y recogido durante la mayor parte del periodo diurno. En estos experimentos la influencia del doble techo móvil sobre el microclima del invernadero en el periodo nocturno puede considerarse similar a la de un doble techo fijo poco hermético, ya que las uniones entre las láminas plásticas contiguas del doble techo móvil eran poco herméticas, comparadas con las del doble techo fijo (Hernández y col., 2017). Asimismo, se puede considerar que el aire del invernadero con doble techo móvil recogido presentó durante gran parte del periodo diurno condiciones climáticas similares a un invernadero sin doble techo.

En el ensayo realizado en el invernadero tipo parral con doble techo fijo de manta térmica (Fotografía 16), la manta se colocó horizontalmente de manera permanente entre el cultivo y el techo del

Fotografía 16. Invernadero multitúnel con doble techo fijo de plástico (arriba izquierda) y multitúnel con doble techo móvil de plástico (arriba derecha), e invernadero parral con doble techo de manta térmica (abajo).

invernadero cuando las temperaturas del aire nocturnas comenzaron a descender por debajo de 12ºC.

3.1. Doble techo fijo

3.1.1 Radiación

El doble techo fijo de plástico, a pesar de estar formado por láminas muy transmisivas, reduce la radiación solar (onda corta) que llega al cultivo en periodos en los que la radiación solar puede ser limitante. En las medidas realizadas en enero (periodo frío del año) en invernaderos multitúnel idénticos, la transmisividad media diaria a la radiación solar fue de 65% en el invernadero sin doble techo con un cultivo de melón y de 53% en otro invernadero idéntico con doble techo fijo de plástico y un cultivo de pepino (Hernández y col., 2017). El doble techo fijo de manta térmica, instalado en un invernadero parral, produjo una reducción aún mayor de la radiación solar que llega al cultivo. La transmisividad media a la radiación fotosintéticamente actica (PAR), medida al mediodía solar a lo largo del ciclo de cultivo, fue del 41% y del 56% en el invernadero con y sin doble techo fijo de manta, respectivamente (López y col., 2003). Es decir, el doble techo fijo de manta térmica redujo la transmisividad PAR un 15% respecto al invernadero sin doble techo. Estas reducciones de la radiación que llega al cultivo pueden ser relevantes en ciclos de cultivo de invierno en los invernaderos

mediterráneos, donde la radiación fotosintética activa suele limitar la producción de los cultivos en periodos fríos (Soriano y col., 2004).

3.1.2 Otras variables climáticas

El doble techo fijo, que divide el volumen de aire del invernadero en una cámara inferior donde está el cultivo y otra superior (Fig. 1), modifica la temperatura, la humedad y la concentración de dióxido de carbono (CO_2) del aire próximo al cultivo, ya que reduce: i) el volumen de aire (cámara inferior) por unidad de superficie de suelo; ii) la renovación del aire vía infiltración o ventilación y iii) las pérdidas por convección, conducción y radiación de la cubierta. En los ensayos realizados en los invernaderos multitúnel en la Fundación Cajamar con doble techo fijo de plástico impermeable (Hernández y col., 2017), aunque en un mismo ciclo de cultivo no se comparó el invernadero con y sin doble techo fijo de plástico, del análisis de los datos se puede deducir que la temperatura y la humedad absoluta del aire situado por debajo del doble techo de plástico (cámara inferior) fue, normalmente, mayor que la del aire situado por encima (cámara superior) durante todo el día (Hernández y col., 2017), especialmente durante el periodo diurno (Fig. 2), mientras que la humedad relativa del aire fue ligeramente menor bajo el doble techo que por encima durante la noche y mayor durante el periodo diurno (Fig. 3). Un comportamiento similar encontró Piscia y col. (2012) usando simulaciones de CFD. El doble techo fijo de plástico aumentó la temperatura del aire cercano al cultivo de pepino de invierno (medida a 2,0 m por encima del suelo) entre 1,5 y 2,4ºC la media nocturna, con respecto a la exterior (Hernández y col., 2017), y entre 0,5 y 1,1ºC la media diurna, con respecto al invernadero con un doble techo móvil recogido.

En general, los efectos climáticos del doble techo fijo pueden ser positivos para los ciclos hortícolas de invierno en los invernaderos mediterráneos con buenas características de ventilación (capaces de evacuar rápidamente el exceso de calor o vapor de agua durante el periodo diurno), pero no para los mal ventilados. En estos últimos, al reducir el movimiento de aire interno y la tasa de ventilación, el doble techo fijo puede intensificar los problemas de excesos de temperatura o humedad del aire favoreciendo los 'golpes de calor' en días de fuerte insolación y la proliferación de enfermedades fúngicas, así como reducir la transpiración y la movilización de nutrientes. Aunque no se comparó en un mismo ciclo de cultivo el invernadero con y sin doble techo de plástico fijo, el análisis de los datos climáticos (Hernández y col., 2017) revela que el doble techo fijo, a pesar de aumentar la temperatura del aire cercano al cultivo, no evitó la formación de condensación en la superficie inferior del doble techo durante la segunda mitad del ciclo del pepino (Fig. 4), por lo que es importante que el material plástico sea antigoteo y tenga suficiente pendiente para que el agua de condensación escurra y no caiga sobre el cultivo.

Estos efectos climáticos del doble techo fijo pueden ser mayores en los invernaderos comerciales mediterráneos (Teitel y col., 2009), donde la relación entre la superficie total cubierta del invernadero (techo más paredes) y la superficie del suelo es menor que en el

invernadero utilizado en este trabajo experimental (Hernández y col., 2017). Esta menor relación puede reducir, en términos relativos, la pérdida de radiación de onda larga de la cubierta, el principal componente de las pérdidas de energía por la noche en los invernaderos de plástico de bajo coste (Baille y col., 2006), y, por tanto, puede aumentar el efecto térmico nocturno del doble techo fijo. La condensación de agua en las superficies de la cubierta y del cultivo también puede ser más frecuente e intensa en los invernaderos comerciales mediterráneos, que suelen ser más grandes y menos ventilados (superficie media de ventilación de unos 0,13 m^2 ventanas m^{-2} suelo) que el invernadero utilizado en este trabajo (0,26 m^2 ventanas m^{-2} suelo).

Además, el doble techo fijo aumenta ligeramente la temperatura nocturna de la cubierta vegetal. En el mes más frío del ciclo de melón la temperatura media nocturna de la cubierta vegetal del cultivo de melón fue 0,9ºC mayor en el invernadero con doble techo, respecto al

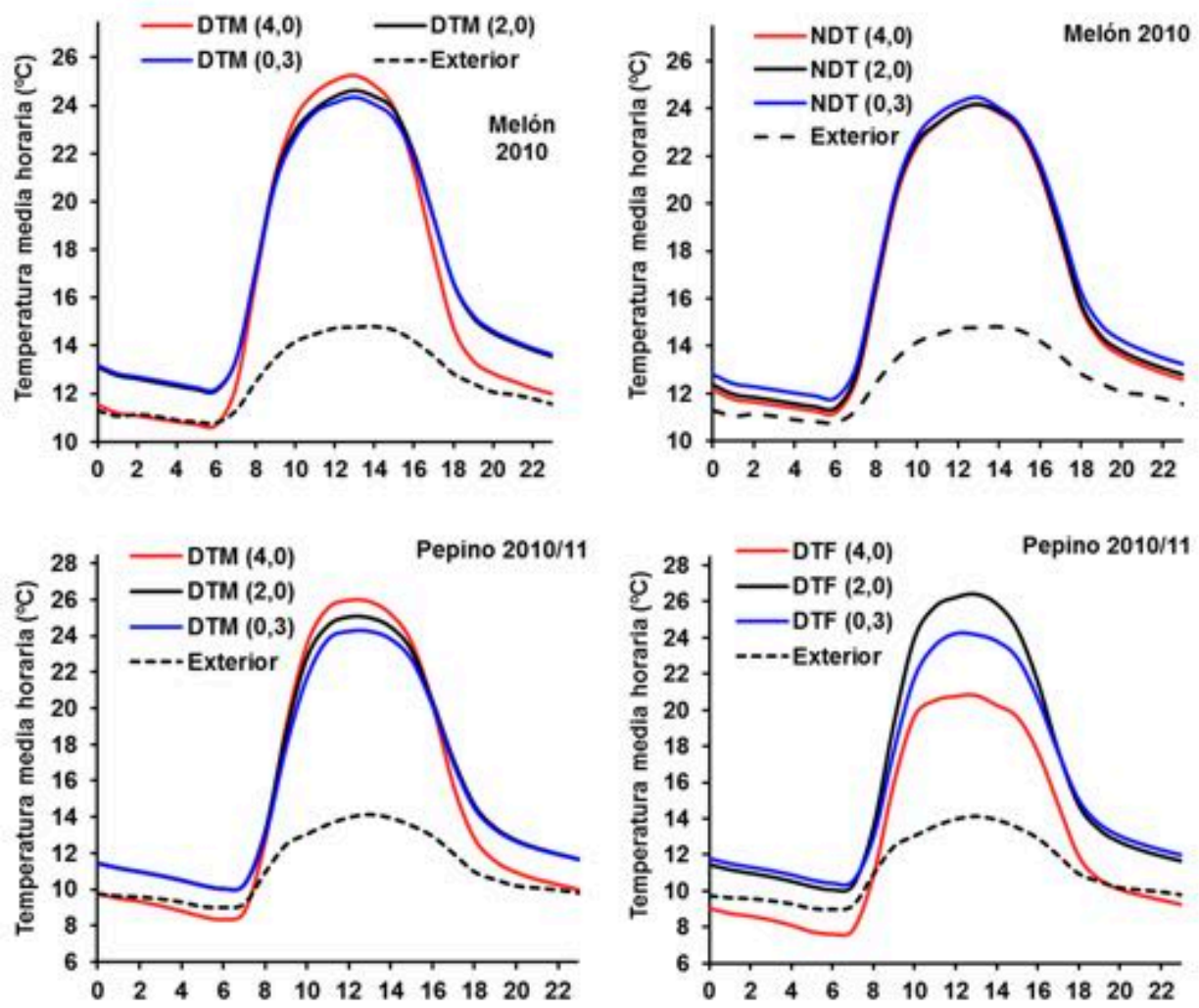


Figura 2. Valores medios horarios, promediados durante los meses fríos de febrero y marzo, de la temperatura del aire del invernadero medida a 0,3 m, 2,0 m y 4,0 m sobre el suelo y fuera del invernadero en un melón cultivado en dos invernaderos, uno con (DTM) o sin (NDT) doble techo móvil de plástico, y en un pepino cultivado en dos invernaderos, uno con doble techo móvil de plástico (DTM) y otro con doble techo fijo de plástico (DTF).

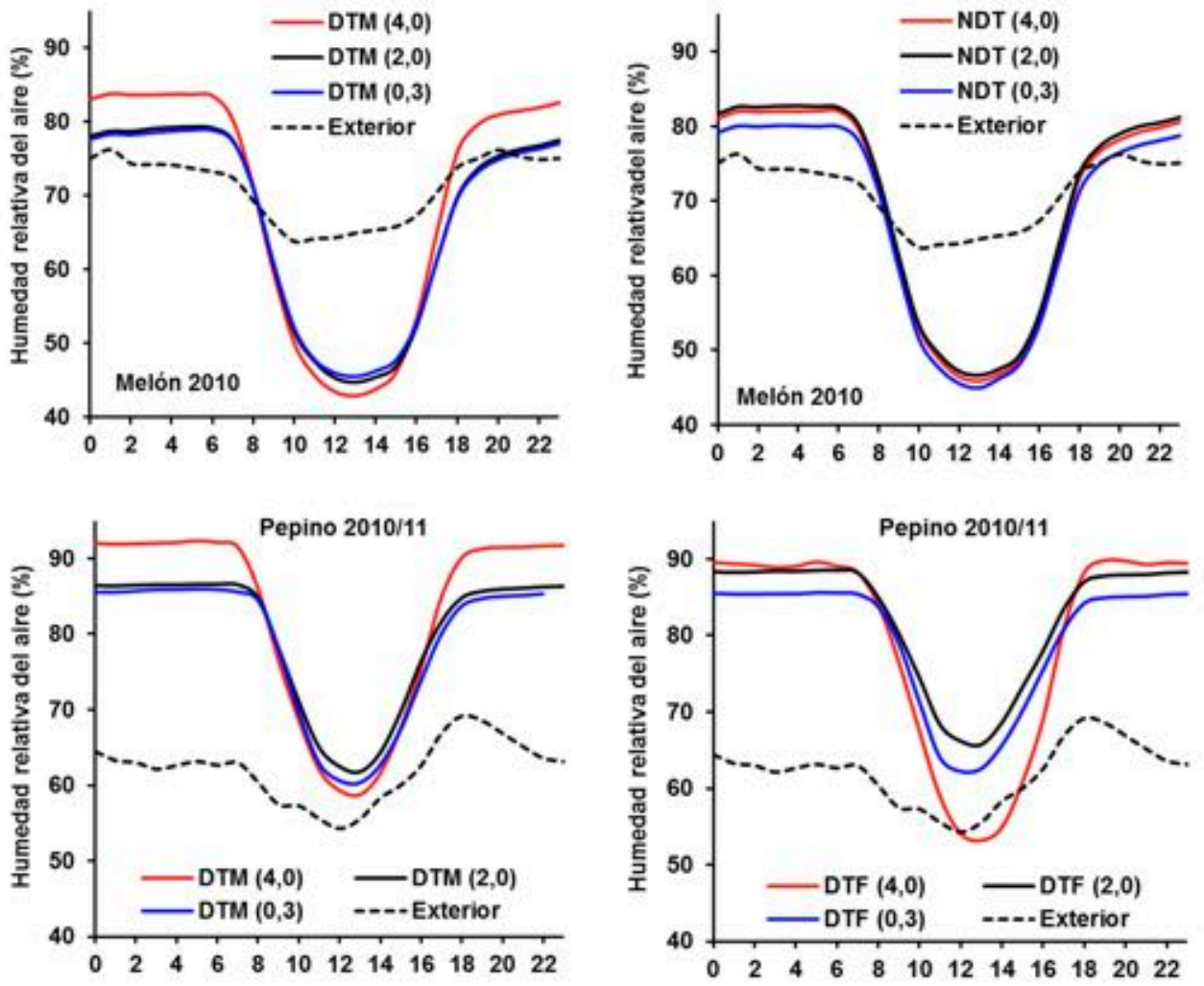


Figura 3. Valores medios horarios, promediados durante los meses fríos de febrero y marzo, de la humedad relativa del aire del invernadero, medida a 0,3 m, 2,0 m y 4,0 m sobre el suelo y fuera del invernadero, en un melón cultivado en dos invernaderos, uno con (DTM) o sin (NDT) doble techo móvil de plástico, y en un pepino cultivado en dos invernaderos, uno con doble techo móvil de plástico (DTM) y otro con doble techo fijo (DTF).

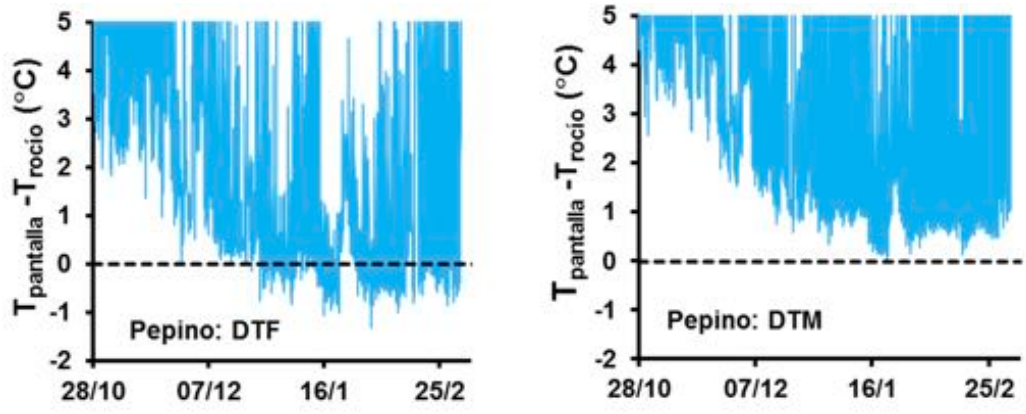


Figura 4. Diferencias entre la temperatura de la superficie inferior del doble techo de plástico y la temperatura de rocío del aire que le rodea a lo largo de un cultivo de pepino en dos invernaderos idénticos, uno con doble techo fijo de plástico (DTF) y otro con doble techo móvil de plástico (DTM).

invernadero sin doble techo (Hernández y col., 2017).

El doble techo fijo también reduce la concentración de CO_2 del aire que rodea al cultivo. En un ciclo de invierno de pepino (*cv*. Valle) en dos invernaderos multitunel idénticos, el doble techo fijo de plástico redujo ligeramente la concentración diurna de CO_2 del aire alrededor del cultivo, con respecto al cultivo con doble techo móvil de plástico recogido (Fig. 5), donde la concentración media diurna del aire cercano al cultivo durante el mes de enero fue de 366 y 387 μmol CO_2 (mol aire)$^{-1}$ en el invernadero con doble techo fijo y con doble techo móvil recogido, respectivamente.

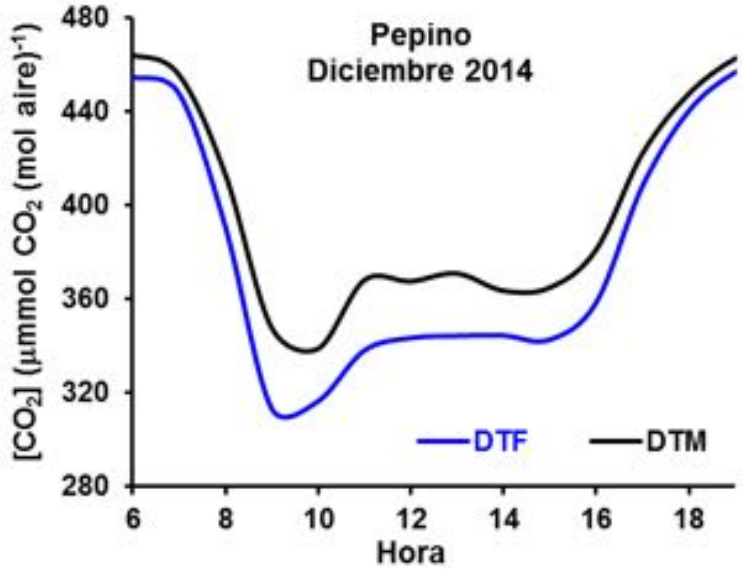


Figura 5. Concentración de dióxido de carbono [CO_2] en el aire cercano a un cultivo de invierno de pepino durante el periodo diurno (promedio mensual) en dos invernaderos idénticos, uno con doble techo fijo de plástico (DTF) y otro con doble techo móvil de plástico (DTM) recogido durante el periodo diurno.

Por otro lado, en el ensayo de doble techo fijo de manta térmica (López y col., 2003), la temperatura media nocturna del aire cercano al cultivo durante el periodo frío fue ligeramente superior en invernadero con doble techo de manta térmica, entre 0,2 y 0,5ºC con una diferencia máxima de 1ºC en el día más frío, mientras que la temperatura media diurna fue ligeramente mayor en el invernadero sin doble techo, con diferencias menores de 1ºC. Este comportamiento diurno del doble techo de manta térmica, opuesto al encontrado en el doble techo de plástico impermeable (Hernández y col., 2017), pudo ser debido a la fuerte reducción de la transmisividad a la radiación solar que provoca la manta térmica y a la porosidad de la misma, lo que resulta en una menor entrada de energía y una mayor renovación de aire, respecto al doble techo con plástico impermeable. En cuanto a la humedad relativa, no se encontraron diferencias claras entre el invernadero con y sin doble techo fijo de manta térmica.

Del análisis de los datos de los experimentos realizados con dobles techos de plástico impermeable (Hernández y col., 2017) también se

puede deducir que, a grandes rasgos, no hubo diferencias de temperatura del sustrato ni del suelo entre el invernadero con y sin doble techo de plástico fijo, aunque el doble techo fijo aumentó ligeramente ambas temperaturas. En el ensayo de doble techo fijo con manta térmica, donde se midió la temperatura del sustrato (perlita) al amanecer durante el periodo más frío, se encontraron valores ligeramente superiores en el invernadero con doble techo fijo de manta térmica, con diferencias de hasta 1ºC (López y col., 2003).

Como resumen, el doble techo fijo de plástico, en la zona de cultivo, reduce la radiación solar, aumenta la temperatura del aire durante todo el día, reduce ligeramente la humedad relativa del aire durante la noche y la aumenta durante el periodo diurno, aumenta ligeramente la temperatura nocturna del cultivo y reduce la concentración diurna de CO_2 del aire, pero no evita la formación de condensación de agua sobre el mismo, por lo que requiere cierta pendiente y tensión para que el agua escurra y no moje al cultivo. La intensidad de estos cambios climáticos dependerá, sobre todo, de la hermeticidad del doble techo, de la ventilación del invernadero y del manejo de la misma. El doble techo fijo de manta térmica redujo substancialmente la radiación que llegó al cultivo y apenas modificó la temperatura del aire y la humedad relativa en la zona de cultivo durante el día.

3.2. Doble techo móvil de plástico

El objetivo del doble techo móvil de plástico respecto al clima es que actúe como una pantalla térmica móvil (Fig. 6). Durante el periodo diurno el doble techo móvil (cuando está recogido) apenas debe afectar a la entrada de radiación solar ni a otros parámetros climáticos del invernadero, mientras que durante el periodo nocturno (cuando está extendido) el doble techo debe aumentar la temperatura y reducir la humedad relativa del aire de la cámara inferior donde está el cultivo, respecto a la cámara superior. Además, el doble techo móvil al ser impermeable debe evitar la caída de agua de lluvia/condensación sobre el cultivo.

El doble techo móvil de plástico impermeable desarrollado y evaluado por Hernández y col.(2017) redujo claramente

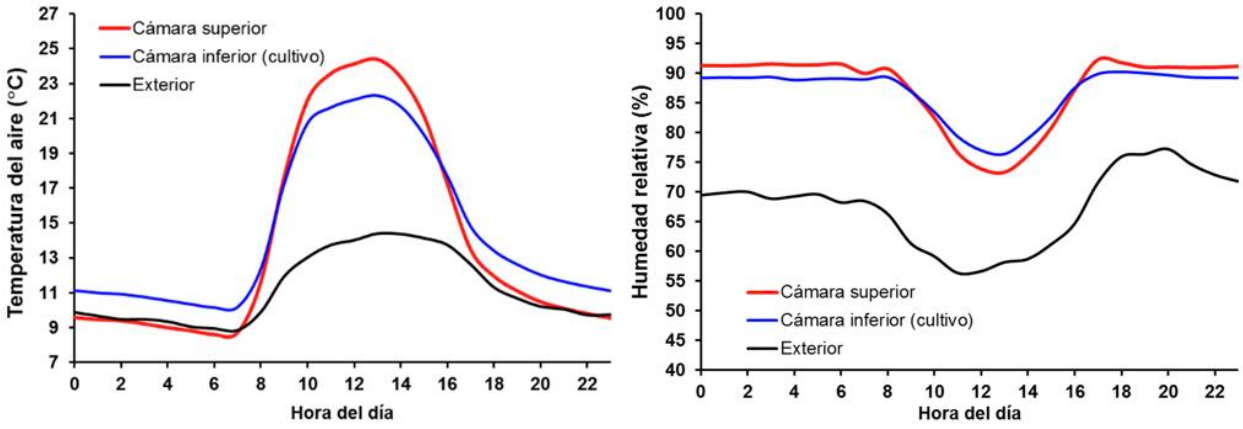


Figura 6. Temperatura y humedad relativa del aire en la cámara superior e inferior (donde está el cultivo) en un invernadero con una pantalla térmica móvil de plástico, así como en el exterior, en un día de invierno en Almería.

la transmisividad media diaria del invernadero a la radiación solar. En el mes de enero (periodo frío), el invernadero con doble techo móvil con sus láminas plásticas recogidas presentó valores medios diarios de transmisividad inferiores (53% en melón y 54% en pepino) a los del invernadero sin doble techo (65% en melón) y similares a los medidos en el invernadero con doble techo fijo (53% en pepino), mientras que los valores cuando el doble techo estaba extendido fueron del 49% en melón y del 48% en pepino. La reducción de transmisividad (11-12%, respecto al invernadero sin doble techo) es claramente mayor que la encontrada habitualmente en los invernaderos de alta tecnología de regiones templadas con pantallas térmicas móviles convencionales (Campen y col., 2009), siempre inferior al 5% (Plaisier, 1992), lo que pudo deberse a que las láminas plásticas impermeables del doble techo móvil no se pliegan y despliegan fácilmente como los materiales de las pantallas térmicas convencionales, y producen un significativo sombreo cuando están recogidas. Esta reducción de la radiación que llega al cultivo, como se ha indicado anteriormente, puede limitar el crecimiento y productividad de los cultivos hortícolas en periodos fríos (Soriano y col., 2004).

El invernadero con doble techo móvil de plástico impermeable también presentó durante el periodo nocturno mayor temperatura y menor humedad relativa en el aire situado por debajo del doble techo (cámara inferior) que en el aire situado por encima (Figs. 2 y 3). En el cultivo de melón, el doble techo móvil redujo durante la noche la humedad relativa del aire situado por debajo del mismo (Fig. 3), especialmente la del aire cercano al cultivo (alrededor del 5% a 2,0 m sobre el suelo, con respecto al invernadero sin doble techo), lo que fue debido principalmente a la mayor temperatura nocturna del aire (Fig. 2), ya que la humedad absoluta nocturna del aire fue similar con y sin doble techo (Hernández y col., 2017). Esta reducción de la humedad relativa puede ser importante para evitar condensaciones en el cultivo o en el doble techo. De hecho, no se encontró condensación de agua en la superficie de la cara interna del doble techo móvil en los dos cultivos estudiados (Hernández y col., 2017). La figura 4 muestra cómo la temperatura del punto de rocío del aire cercano al cultivo fue inferior a la temperatura de la superficie interna del doble techo móvil durante todo el ciclo de pepino 2010/11, evitando la formación de condensación sobre las láminas del mismo. El doble techo móvil también redujo la humedad absoluta del aire cercano al cultivo (a 2,0 m del suelo), durante el periodo diurno, frente al doble techo fijo, siendo la media a lo largo del ciclo de pepino de 9,9 y 10,7 g kg^{-1}, respectivamente, y lo contrario ocurrió en el aire situado por encima del doble techo (9,9 *versus* 7,9 g kg^{-1}).

Como resumen, el invernadero con doble techo móvil de plástico, con respecto al invernadero con doble techo fijo de plástico, redujo los problemas de condensación de agua en el plástico y el cultivo, y la ocurrencia de periodos de temperatura y humedad excesivas, pero es necesario mejorar la transmisividad a la radiación solar que llega al cultivo. El uso de láminas plásticas impermeables, muy transparentes y fáciles de plegar, si las hubiera, y de los sistemas de extensión y recogida usados en las pantallas térmicas

móviles podrían conseguir reducciones de transmisividad del invernadero similares o cercanas a las de las pantallas térmicas convencionales usadas en invernaderos de alta tecnología de regiones templadas.

4. Crecimiento y productividad de los cultivos en invernaderos con dobles techos

Apenas hay información que compare directamente el crecimiento y la productividad de los cultivos hortícolas en invernaderos con y sin doble techo fijo de plástico, pero el análisis de los datos de crecimiento y la productividad de los cultivos en los experimentos realizados por Hernández y col. (2017) en los invernaderos multitúnel, descritos en la sección 3, nos permite evaluar indirectamente el comportamiento productivo de dichos cultivos en invernaderos con doble techo fijo y móvil. Estos autores no compararon un invernadero con y sin doble techo fijo porque los ciclos de pepino centrados en el periodo invernal en invernaderos sin doble techo sufren, normalmente, severos problemas de enfermedades (mildiu, botrytis, etc.), que hacen que no sean económicamente viables.

En el ciclo temprano de melón 2010, el uso de un doble techo móvil aceleró ligeramente el desarrollo del cultivo (plena floración ocurrió aproximadamente una semana antes) y dio lugar a un patrón de crecimiento del cultivo más generativo (Cuadro 1), lo que aumentó significativamente la productividad precoz comercial de frutos del melón y su calidad (Cuadro 2), con respecto al cultivo en el invernadero sin doble techo (Hernández y col., 2017). Esta respuesta puede atribuirse, principalmente, a la mayor temperatura nocturna del aire por debajo del doble techo (Fig. 2). En el invernadero sin doble techo el cultivo de melón desarrolló una mayor biomasa vegetativa e índice de área foliar final (Cuadro 1), lo que pudo deberse a su menor tasa de desarrollo y a la mayor cantidad de radiación solar que le llegó. Al final del ciclo, no hubieron diferencias significativas en la productividad comercial acumulada entre el cultivo en el invernadero con y sin doble techo móvil (Cuadro 2).

En el ciclo de otoño de pepino 2009 solo se extendió el doble techo móvil durante los últimos días del cultivo, ya que la mayor parte de este cultivo se desarrolló bajo unas condiciones microclimáticas benignas (no limitantes). Al final del ciclo, no se encontraron diferencias significativas entre el cultivo en el invernadero con y sin doble techo móvil en la productividad comercial y total acumulada (Cuadro 2). Los valores ligeramente mayores de productividad del cultivo en el invernadero sin doble techo móvil pudieron deberse a la mayor radiación solar que llegó a este cultivo.

En el ciclo de invierno de pepino 2010/11 no se encontraron diferencias significativas entre el cultivo con doble techo fijo de plástico y con doble techo móvil de plástico en la producción de biomasa seca área final, ni en productividad comercial y total acumulada (Cuadro 1). Solo se encontró una mayor productividad de frutos de primera categoría del cultivo en el invernadero con doble techo móvil. Esta respuesta puede explicarse porque las temperaturas del sustrato y del aire cercano al cultivo (Fig. 2), y la radiación solar que llegó al cultivo fueron similares en ambos invernaderos.

Melón 2010	Biomasa seca (g m^{-2})				IAF (m^2 m^{-2})	IC (g g^{-1})
	Aérea	Hoja	Tallo	Fruto		
NDT	789 a	198 b	111 b	473 a	2,4 b	0,60 a
DTM	756 a	145 a	67 a	544 a	1,6 a	0,72 b
Pepino 2010/11	**Biomasa seca (g m^{-2})**				**IAF (m^2 m^{-2})**	**IC (g g^{-1})**
	Aérea	Hoja	Tallo	Fruto		
DTF	530 a	128 a	75 a	327 a	1,6 a	0,62 b
DTM	554 a	169 b	87 b	298 a	2,0 a	0,54 a

Cuadro 1. Biomasa (materia seca) aérea y componentes, índice de área foliar (IAF) e índice de cosecha (IC) al final del cultivo de: i) melón en dos invernaderos idénticos multitúnel (Hernández y col., 2017), uno con doble techo móvil de plástico (DTM) y otro sin doble techo (NDT); y ii) pepino en dos invernaderos, uno con doble techo móvil de plástico (DTM) y otro con doble techo fijo de plástico (DTF). Letras diferentes en la misma columna indican la ocurrencia de diferencias significativas (P<0,05).

Pepino 2009	Productividad (kg m^{-2})			
	Total	Comercial		No comercial
		Primera	Total	
NDT	15,4 a	13,1 a	13,4 a	2,0 a
DTM	14,7 a	12,5 a	13,2 a	1,5 a
Melon 2010	**Total**	**Comercial**		**No comercial**
		Precoz	Total	
NDT	5,7 a	0,0 a	5,0 a	0,7 a
DTM	5,3 a	2,7 b	4,7 a	0,7 a
Pepino 2010/11	**Total**	**Comercial**		**No Comercial**
		Primera	Total	
DTF	8,7 a	6,2 a	7,2 a	1,5 b
DTM	8,4 a	7,0 b	7,6 a	0,8 a

Cuadro 2. Productividad total, comercial, de primera (precoz en el melón 2010) y no comercial de un cultivo de pepino de otoño (2009), un cultivo de melón temprano de primavera (2010) y un cultivo de invierno de pepino (2010/11) en dos invernaderos multitúnel idénticos, uno con doble techo móvil de plástico (DTM) y otro sin doble techo (NDT) o con doble techo fijo de plástico (DTF). Letras diferentes en la misma columna indican la ocurrencia de diferencias significativas (P<0,05).

La reducción de la transmisividad a la radiación de onda corta causada por el doble techo móvil recogido fue similar a la del doble techo fijo, pero superior a la producida por las pantallas térmicas convencionales en invernaderos de alta tecnología de regiones templadas, inferiores al 5% (Plaisier, 1992). El uso de láminas plásticas impermeables que eviten la caída de agua de lluvia o de condensación sobre el cultivo es esencial para algunos ciclos de invierno en invernaderos mediterráneos, pero las láminas usadas en este prototipo de doble techo móvil (Hernández y col., 2017) produjeron un alto sombreo, ya que no se plegaban y desplegaban fácilmente como los materiales usados en las pantallas térmicas convencionales. La productividad no comercial sí fue significativamente menor en el tratamiento con doble techo móvil de plástico. Aunque no se realizó una evaluación detallada de la incidencia de enfermedades, la menor productividad no comercial del cultivo en el invernadero con doble techo móvil de plástico pudo estar asociada, en parte, a una menor humedad del aire en torno al cultivo, respecto al invernadero con doble techo fijo de plástico.

Por otro lado, en el ensayo en el invernadero tipo parral parral con doble techo fijo de manta térmica (Fotografía 17) se encontró que la producción de materia seca de hojas, frutos y aérea total fue significativamente mayor en el cultivo de pepino en el invernadero sin doble techo que en el cultivo del invernadero con doble techo fijo de manta térmica (Cuadro 3). Además, el doble techo fijo de manta térmica redujo significativamente la productividad del pepino. Al final del cultivo, la productividad comercial fue de 5,3 y 6,7 kg m^{-2} y la total de 5,9 y 7,2 kg m^{-2} para el cultivo con doble techo fijo de manta térmica y sin doble techo, respectivamente (Cuadro 3). Es decir, el uso de un doble techo fijo de manta térmica redujo un 20,7% y un 17,9% la productividad comercial y total, respectivamente. Este descenso de producción debió estar asociado a la reducción del 15% de la radiación PAR que llegó al cultivo producida por el doble techo fijo de manta térmica (López y col., 2003).

	Biomasa aérea (g m^{-2})				Producción comercial (kg m^{-2})	
Pepino	Hojas	Tallos	Frutos	Total	Periodo I	Total
DTF	111 a	86 a	234 a	431 a	1,5 a	5,3 a
NDT	128 b	87 a	289 b	504 b	2,1 b	6,7 b

Cuadro 3. Biomasa aérea en un cultivo de pepino (campaña 2000/01) en dos invernaderos parrales idénticos, uno sin (NDT) y otro con doble techo fijo (DTF) de manta térmica. Producción comercial (kg m^{-2}) para un ciclo de pepino en invernaderos parral con y sin doble techo de manta térmica para diferentes periodos de cosecha en dos periodos: Periodo I (hasta 78 dds) y Total (139 dds). Letras diferentes en la misma columna indican la ocurrencia de diferencias significativas ($P<0,05$).

Imagen 16. Invernadero parral con un cultivo de pepino (campaña 2000/01) sin doble techo (izquierda) y con un doble techo fijo de manta térmica (derecha).

5. Conclusiones

La intensidad de los cambios climáticos inducidos por el doble techo fijo depende, sobre todo, de la hermeticidad y de las características radiométricas del mismo, así como de la ventilación del invernadero y su manejo.

El doble techo fijo modifica el clima en la zona de cultivo: aumenta la temperatura del aire durante todo el día, reduce ligeramente la humedad relativa del aire durante la noche y la aumenta durante el periodo diurno, aumenta ligeramente la temperatura nocturna del cultivo y reduce la concentración diurna de CO_2 del aire. Además, el doble techo fijo reduce la llegada de radiación solar al cultivo y no evita la formación de condensación de agua sobre el mismo, por lo que requiere una pendiente y tensión que permita que el agua escurra y no moje al cultivo.

El invernadero con doble techo móvil, con respecto al invernadero con doble techo fijo, puede evitar/reducir los problemas de condensación de agua en el plástico y el cultivo, y la ocurrencia de periodos de temperatura y humedad excesivas, pero los prototipos evaluados reducen, sustancialmente, la llegada de radiación solar al cultivo.

La manta térmica no parece un material recomendable para el doble techo fijo ya que el efecto térmico nocturno que induce es pequeño, al ser un material poroso, y reduce sustancialmente la radiación solar que llega al cultivo en un periodo del año cuando esta variable limita la productividad de los cultivos hortícolas.

6. Mejoras y necesidades futuras

El uso del doble techo fijo de plástico impermeable se ha extendido en los invernaderos del litoral de Almería con distintas tipologías y usos en función, sobre todo, del cultivo e invernadero, pero la información sobre sus características y las mejoras climáticas y productivas que aporta es escasa. Además, el desarrollo de nuevos tipos, variantes y usos de los dobles techos fijos, como los dos dobles techos fijos con cortinas verticales, requiere un mejor conocimiento de los mismos y su evaluación experimental.

El doble techo fijo de plástico es una

técnica que, en general, mejora las condiciones climáticas para el cultivo, pero precisa del desarrollo de sistemas de control y gestión del clima, tanto de la zona de cultivo como de la zona superior, para evitar elevadas temperaturas y humedades, y niveles bajos de CO_2 en el aire. Además de la mejora climática en la zona de cultivo, el doble techo persigue limitar el desarrollo de enfermedades, principalmente por hongos y bacterias, y fisiopatías, al reducir la caída de agua sobre el cultivo. La información sobre el clima generado por el doble techo fijo es limitada, pero la información sobre su efecto en la incidencia de enfermedades es aún menor. Sería preciso determinar cuantitativamente la incidencia de enfermedades y fisiopatías en invernaderos con y sin dobles techos fijos, para poder valorar el impacto económico y medioambiental del doble techo sobre el control de las mismas.

El doble techo móvil de plástico en los invernaderos mediterráneos genera algunas mejoras climáticas respecto al doble techo fijo impermeable, pero su uso comercial es cuestionable por su mayor coste económico. Además, su uso comercial, requeriría aumentar su hermeticidad y, sobre todo, minimizar las pérdidas de radiación solar que produce cuando está recogido. Para ello sería importante disponer de láminas plásticas impermeables, transparentes y fácilmente plegables. El doble techo parcialmente móvil, que permite aperturas en forma de rombos repartidas por toda la superficie del invernadero, puede reducir los problemas climáticos que genera el doble techo fijo y ser una alternativa de bajo coste al mismo, pero es necesario mejorar y evaluar los prototipos existentes.

Bibliografía

Baille, A., Lopez, J.C., Bonachela, S., Gonzalez-Real, M.M., Montero, J.I. (2006). Night energy balance in a heated low-cost plastic greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology 137, 107–118.

Baptista, F.J.F. (2007). Modelling the climate in unheated tomato greenhouses and predicting Botrytis cinerea infection (Ph.D. thesis) Universidade de Evora, Portugal.

Campen, J.B., Kempkes, F.L.K., Bot, G.P.A. (2009). Mechanically controlled moisture removal from greenhouses. Biosystems Engineering 102(4), 424–432.

Dieleman, J., Kempkes, F. (2006). Energy screens in tomato: Determining the optimal opening strategy. Acta Horticulturae 718, 599–606.

García, M.C., Céspedes, A.J., Lorenzo, P., Pérez-Parra, J.J., Escudero, M.C., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Baeza, E., López, J.C., Magán, J.J., Fernández, M.D., Parra, S., Meca, D.E., Gázquez, J.C., García, R. y Pérez, C. (2016). El sistema de producción hortícola protegido de la provincia de Almería. IFAPA, Almería, 179 pp.

Hernández, J., Bonachela, S., Granados, M.R., López, J.C., Magán, J.J., Montero, J.I. (2017). Microclimate and agronomical effects of internal impermeable screens in an unheated Mediterranean greenhouse. Biosystems Engineering 163, 66–77.

López, J.C., Pérez, C., Pérez-Parra, J., Cabrera, F.J. (2003). Evaluación de dos sistemas de ahorro de energía para un cultivo de pepino en invernadero parral. Actas X Congreso Nacional de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. Pontevedra, p. 392–394.

Piscia, D., Montero, J.I., Baeza, E., Bailey, B.J. (2012). A CFD greenhouse night-time condensation model. Biosystems Engineering 111(2), 141–154.

Plaisier, I.H.F. (1992). Energy saving and climate improvement with thermal screens of ludvig svensson. Acta Horticulturae 312, 137–137.

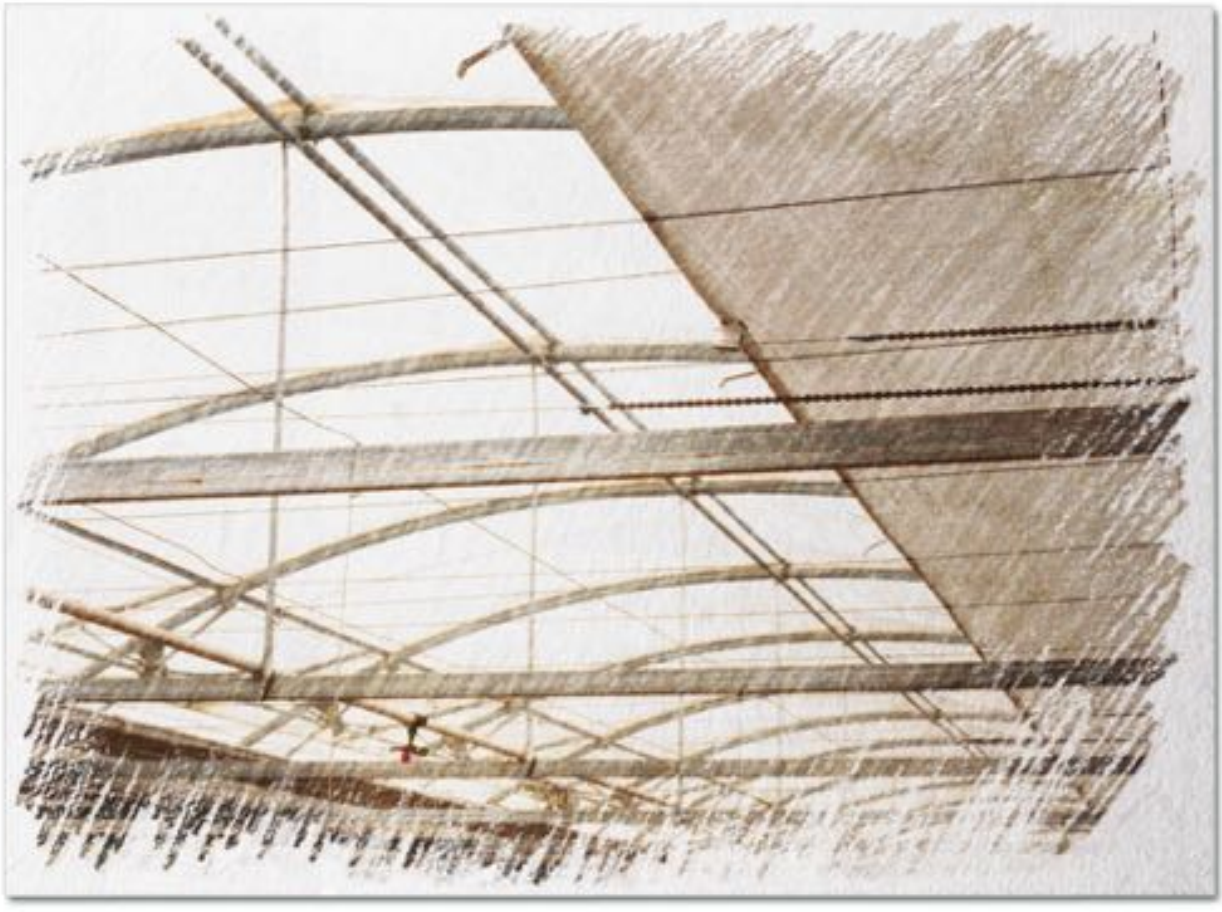
Salvador Sola, F. (2015). Sistemas pasivos de climatización en periodos fríos. Dobles techos. Cajamar Caja Rural. Documentos Técnicos 09, 39 pp.

Soriano, T., Montero, J.I., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Antón, A., Hernández, J., Morales, M.I., Castilla, N. (2004). A Study of direct solar radiation transmission in asymmetrical multi-span greenhouses using scale models and simulation models. Biosystems Engineering 88(2), 243–253.

Pantallas térmicas

Joaquín Hernández[1], Rafael Reyes[2], María Rosa Granados[2], Pilar Lorenzo[2]

[1]Universidad de Almería
[2]IFAPA “La Mojonera”



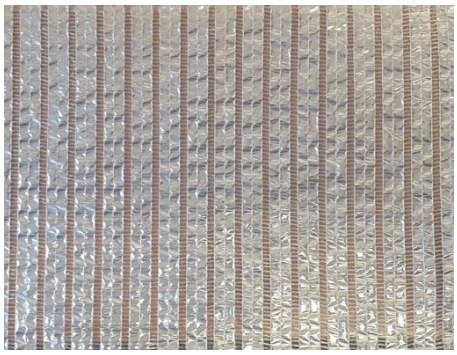
1. Definición y tipos

En un invernadero, se puede considerar como pantalla a cualquier barrera que modifique los intercambios de energía y/o masa entre el volumen que confinan y el resto del invernadero. Esta definición engloba tanto a las pantallas de sombreo, utilizadas en periodos cálidos para reducir la energía entrante, como a las pantallas de ahorro energético o térmicas instaladas para minorar las pérdidas energéticas desde el invernadero hacia el exterior en periodos fríos. Este capítulo se centra en el estudio de las pantallas térmicas. Los dobles techos, mediante láminas plásticas colocadas de manera permanente, que también se pueden incluir dentro de la definición de pantalla, se analizan en un capitulo independiente dado su gran uso en los invernaderos mediterráneos.

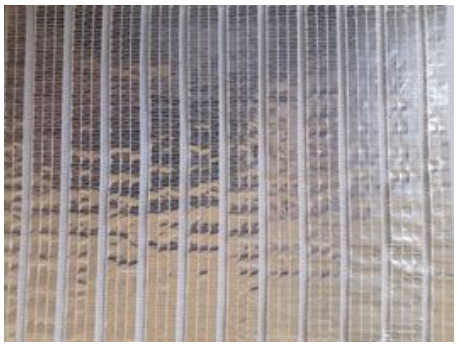
Las pantallas térmicas pueden ser tejidas (formadas por hilos o filamentos), no tejidas (láminas continuas) o, más usualmente, una combinación de tejidos y no tejidos (pequeñas tiras de materiales plásticos o metalizados con una urdimbre de hilos). Mayoritariamente se usan pantallas que alternan tiras de poliéster o acrílico transparente o aluminizado unidas por hilos acrílicos. En menor medida también pueden usarse hilos de polietileno y polipropileno que tienen una menor durabilidad. Las pantallas pueden tener una única capa o ser multicapa.

En función de la continuidad del material se diferencian entre pantallas de estructura cerrada y abierta. En las cerradas el material es una lámina continua (por ejemplo, una lámina plástica) que no permite el intercambio de aire entre la zona de cultivo bajo ellas y el techo del invernadero. Las pantallas abiertas están formadas por láminas trenzadas que dejan espacios entre sí para permitir el intercambio de aire.

Abierta. Láminas aluminizadas trenzadas



Abierta. Láminas aluminizadas unidas con hilos



Cerrada: Láminas aluminizadas unidas por hilos sobre una lámina plástica

Cerrada: Lámina plástica e hilos termosoldados

Figura 1: Ejemplos de materiales.

La pantalla térmica suele ser móvil para permitir su extensión o recogida en función de las necesidades del cultivo, aunque, también se instalan como fijas en determinados periodos de cultivo (Bakker y van Holsteijn, 1995). En los invernaderos del litoral de Almería lo más usual es la instalación fija, durante el periodo invernal, con láminas de material plástico de alta transmisividad que suelen disponerse horizontales o con ligera pendiente para evacuar el agua de condensación. Las pantallas térmicas móviles, que habitualmente se extienden durante la noche y se recogen durante el periodo diurno, suelen instalarse horizontalmente y deben minimizar el sombreo cuando están recogidas por lo que el material debe plegarse con facilidad para ocupar el menor espacio posible. Además, si es posible, la pantalla debe plegarse con orientación norte-sur para permitir un reparto homogéneo de las sombras durante el día (la disposición este-oeste proyecta una sombra fija hacia el norte durante todo el día). Básicamente, existen dos sistemas para extender y recoger las pantallas: mediante un sistema tubo-cremallera (un tubo apoyado en rodillos recorre el invernadero unido a una cremallera engranada con un piñón en un motor) o bien mediante un sistema de cables conectados a una polea (un eje de transmisión atraviesa el invernadero y mueve los cables que están unidos al borde delantero de la pantalla).

Las láminas plásticas convencionales no se pliegan bien y por tanto no son muy adaptables a estos sistemas. En caso de utilizarlas hay que plantearse un sistema de extensión/retirada mediante un tubo giratorio que se desplace enrollando o desenrollando el material.

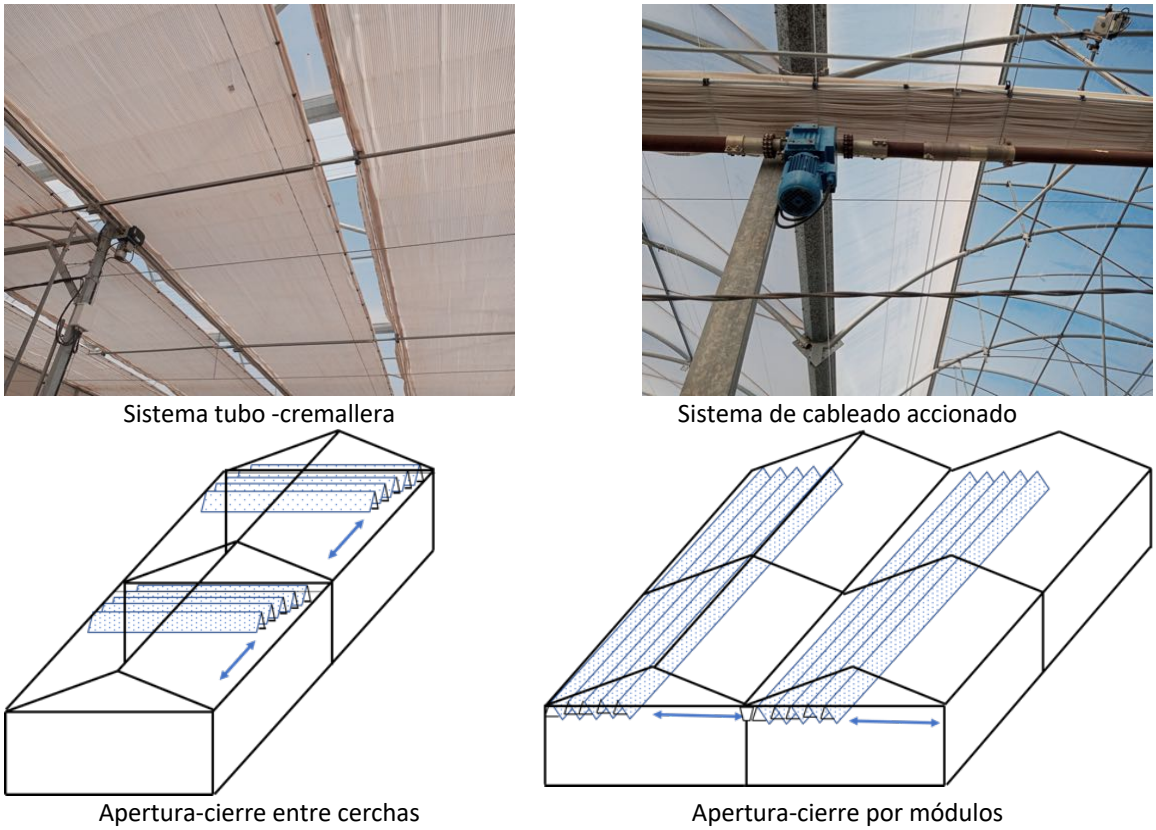


Figura 2: Sistemas de apertura-cierre

En función de las características del invernadero (fundamentalmente la presencia de obstáculos) los sistemas de apertura y cierre pueden ser de cercha a cercha o de canalón a canalón (Fig. 2).

En los invernaderos climatizados de centro y norte de Europa, particularmente en los Países Bajos, el uso de las pantallas térmicas se ha extendido desde la crisis energética de los años 70 del pasado siglo y, a finales del mismo, casi el 70% de los invernaderos estaban equipados con pantallas térmicas, mayoritariamente móviles (Bakker y Van Holstein, 1995). En la actualidad, las pantallas térmicas son una parte integral de estos invernaderos con el objetivo del ahorro energético reduciendo el consumo de combustible. En los invernaderos del litoral mediterráneo español el uso de pantallas térmicas es muy escaso (García y col., 2016) debido a su elevado coste y a la dificultad de su instalación y manejo en los invernaderos artesanales y está, en general, restringido a invernaderos industriales y con sistemas de calefacción.

2. Efectos de las pantallas térmicas sobre el microclima

La pantalla térmica extendida, al dividir el volumen del invernadero en una cámara inferior donde está el cultivo y otra superior, modifica el microclima del invernadero ya que reduce: i) las pérdidas de radiación infrarroja al reducir la transmisividad del invernadero a la misma; ii) el volumen de aire próximo al cultivo (cámara inferior) por unidad de superficie de suelo, lo que también reduce el volumen de aire a calentar cuando se usan sistemas activos de calefacción; iii) la renovación del aire próximo al cultivo vía infiltración o ventilación; iv) las pérdidas por convección, conducción y radiación de la cubierta del invernadero al reducir la temperatura del aire situado en la cámara superior en contacto con la cubierta.

2.1. Efectos sobre el balance de energía

Un invernadero pierde energía mediante intercambios de energía por radiación, conducción y convección en sus paredes, e intercambios convectivos de aire a través de sus huecos y ventanas (perdidas por infiltración y ventilación). Las pantallas térmicas, al reducir las pérdidas de radiación infrarroja y afectar a la ventilación, infiltración y a la convección del invernadero, modifican sustancialmente el balance de energía nocturno (Bakker y Van Holstein, 1995; Kittas y col., 2003; De Zwart y col., 2018).

La radiación infrarroja o térmica emitida por los elementos del invernadero (cultivo, suelo, estructura, etc.) atraviesan el material de cerramiento en función de su transmisividad a la misma. En los invernaderos mediterráneos con material plástico como cerramiento de la cubierta, durante la noche, el intercambio radiativo es el proceso más importante en la disipación de energía a través de la cubierta (Baille y col., 2006). Cuando una pantalla térmica está extendida la radiación emitida por el cultivo/suelo es absorbida, reflejada o transmitida por el material de la pantalla en función de sus características y propiedades ópticas. Para maximizar el ahorro energético, el material de la pantalla debe tener baja emisividad y baja transmisividad a la radiación infrarroja y, por tanto, una alta reflectividad a la misma (Hemming y col., 2018).

La pantalla térmica también modifica los intercambios de energía por

convección, sobre todo, al reducir el volumen de aire en contacto directo con el cultivo/suelo. El suelo en los invernaderos mediterráneos, al presentar mayores temperaturas durante gran parte de la noche que el aire que lo rodea (Bonachela y col., 2012) suele actuar como una fuente de energía durante la noche (Baille y col., 2006) calentando el aire del invernadero mediante intercambios de energía por convección. Por ello, en los invernaderos mediterráneos, que reciben niveles de radiación solar importantes incluso durante el período invernal, el uso de simples sistemas pasivos o activos que aumenten el almacenamiento de energía solar en el suelo durante el día y su liberación durante la noche podría mejorar la eficiencia global de estas estructuras (Baille, 1999). Baille y col. (2006) en Almería estimaron que aproximadamente 50 W m^{-2} se intercambian durante la noche entre el aire del invernadero y la cubierta por lo que cuando se utilizan calefacciones de bajo nivel estas pérdidas convectivas pueden llegar a ser incluso mayores que las aportadas por la calefacción (Tantau y Akyazi, 2017). La energía captada por la cara interna del material de cubierta es transportada al exterior del invernadero por conducción y desde allí se pierde por convección y, sobre todo, por radiación al cielo. La intensidad en estas transferencias de energía va a depender del viento, de la presencia de nubes y del vapor de agua en la atmósfera. En noches de cielos despejados la temperatura del cielo es más baja que en condiciones de nubosidad haciendo que los balances de radiación de onda larga de los invernaderos sean muy negativos. Esto provoca el fenómeno de la inversión térmica nocturna (la temperatura del aire del invernadero es menor que la del aire exterior) que es frecuente en los invernaderos mediterráneos. Munar y Aldana (2019) demostraron la eficacia del uso de una pantalla térmica para evitar este fenómeno. Piscia (2012) indicó que en condiciones de cielo muy despejado la pantalla puede evitar la inversión térmica si el flujo de calor del suelo es de unos 17 W m^{-2}, mientras que un invernadero sin pantalla precisaría de un flujo de unos 40 W m^{-2} para evitarla.

El aire del invernadero que asciende hasta el techo también transporta vapor de agua que, en contacto con el material de cerramiento, provoca condensación. La pantalla térmica (en función de su porosidad) reduce el movimiento del aire de la zona de cultivo al techo del invernadero estableciendo una nueva zona de intercambios convectivos. De este modo, en el invernadero se establecen dos espacios termo-higrométricamente diferenciados: la zona de cultivo bajo la pantalla y la zona entre la cubierta y la pantalla. Esto minora las pérdidas energéticas entre la zona de cultivo y el exterior al reducir el intercambio de aire dentro del invernadero, el volumen de aire a calentar (en el caso de utilizar calefacción), y la razón suelo/volumen (Teitel y col., 2006; Levit y Piacentini, 1994; Frangi y col., 2011).

2.2. Microclima y ahorro de energía

En los invernaderos sin sistemas activos de calefacción el uso de pantallas térmicas, al modificar los balances de energía dentro del invernadero, producen discretos aumentos en la temperatura del cultivo y del aire que le rodea, aunque la información experimental disponible es

escasa. Meca y col. (2003), en un invernadero parral en El Ejido con cultivo de pepino en ciclo de otoño-invierno, encontraron que el uso de pantallas térmicas aluminizadas de estructura cerrada y abierta aumentó la temperatura nocturna media del aire del invernadero hasta 2°C, respecto al invernadero sin pantalla, mientras que los incrementos de la temperatura media diaria del aire fueron de 0,1°C en el invernadero con pantalla abierta y de 0,6°C en el invernadero con pantalla cerrada. Durante la noche la temperatura media del aire situado por encima de la pantalla fue de 2°C más baja que la del aire situado bajo la misma. López y col. (2003), en el mismo invernadero y con un ciclo de pepino similar, encontraron pequeños incrementos térmicos durante la noche al usar una pantalla aluminizada: entre 0,5 y 1,0°C en la temperatura media del aire y en torno a 1°C en la temperatura del sustrato. En la misma zona, en un ciclo de invierno-primavera de melón, Hernández y col. (2017) obtuvieron resultados similares en invernaderos multitúnel idénticos con y sin pantalla térmica de polietileno. Durante la noche la pantalla extendida incrementó la temperatura del aire 0,8°C y hasta 0,9ºC la temperatura del cultivo mientras que la temperatura del aire por encima de la pantalla era en torno a 1,5ºC menor que la medida en el invernadero sin pantalla. Los aumentos de temperatura en los invernaderos sin calefacción oscilan entre los 2,0°C para condiciones de cielo totalmente despejado y casi cero para cielos cubiertos (Piscia, 2012).

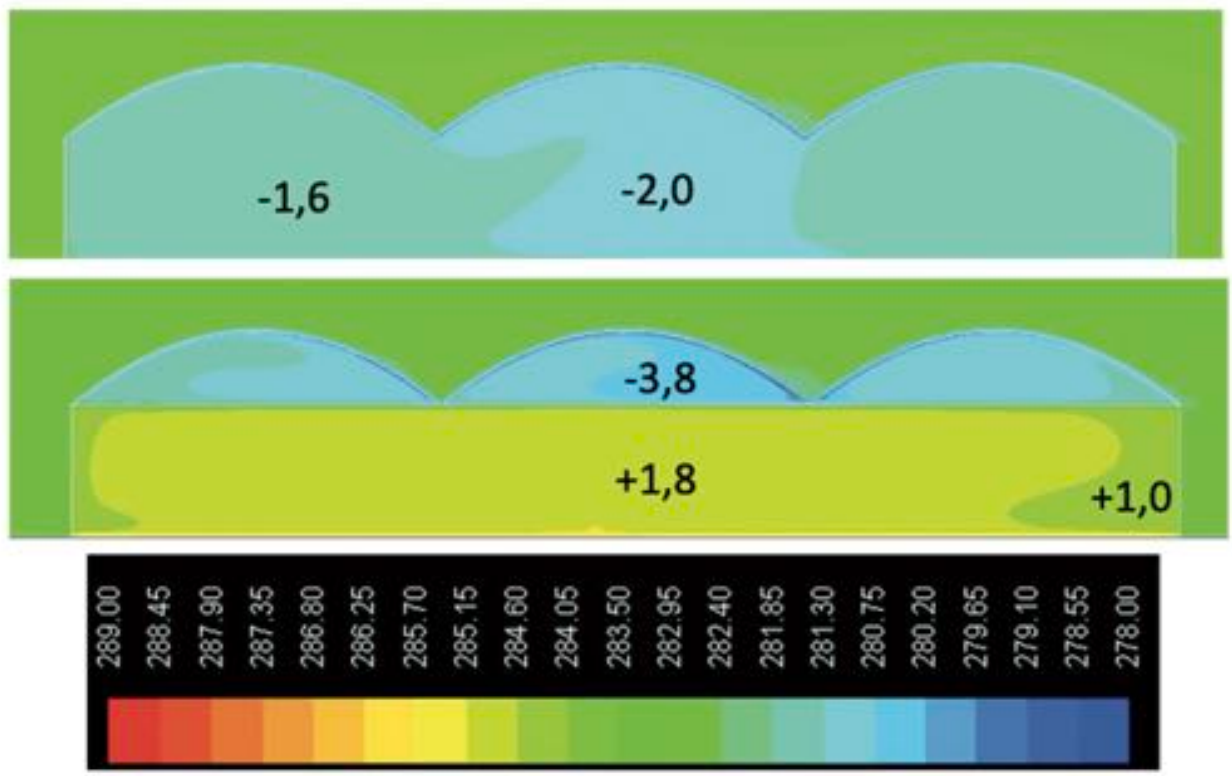


Figura 3: Simulación CFD realizada para una temperatura de cielo 20°K menor que la temperatura del aire exterior. Los números indican el diferencial térmico con respecto a la temperatura exterior (Adaptada de Montero y col., 2013).

Los modelos permiten simular el perfil de temperaturas dentro del invernadero y como se modifica con el uso de una pantalla. Montero y col. (2013) desarrollaron un modelo de CFD para simular el comportamiento térmico de invernaderos mediterráneos bajo distintas condiciones de temperatura del cielo. La figura 3 muestra la temperatura simulada del aire en el invernadero con y sin una pantalla térmica extendida, y con una temperatura del cielo 20ºK más baja que la temperatura del aire exterior. La pantalla evita la inversión térmica en la zona de cultivo al reducir las pérdidas de energía emitida desde el suelo. En el aire situado por encima de la pantalla la inversión térmica es más acusada que en el invernadero sin pantalla. En el invernadero con pantalla también se observa como el aire cercano a las paredes laterales tiene un menor incremento térmico que el aire de las zonas alejadas de la pared, debido a las pérdidas energéticas que se dan a través de estas paredes. Para minorar estas pérdidas se pueden instalar pantallas térmicas verticales. Además, es importante reducir los intercambios de aire entre las cámaras inferior y superior del invernadero. Para ello, en los laterales de las pantallas pueden instalarse unos "faldones", los bordes de las pantallas pueden llevar juntas de goma o sobreponerse unas a otras, etc. (Fig. 4). Montero y col. (2013) también analizaron el comportamiento energético de una pantalla térmica móvil colocada en el exterior del invernadero y comprobaron como este sistema evitaba la inversión térmica nocturna y conseguía incrementos de temperatura de aire entre 2,1 y 3,4ºC.

Durante la noche, sobre todo, en el periodo frío, es habitual que la temperatura del material de cubierta del invernadero alcance valores inferiores al punto de rocío del aire cercano produciéndose condensación de agua y goteo sobre los cultivos. En invernaderos sin calefacción y con pantallas térmicas, la temperatura del aire situado en la cámara superior es más baja que en ausencia de pantalla, por lo que el aire es capaz de almacenar menor cantidad de vapor de agua. Ello puede aumentar la humedad relativa (Hernández y col., 2017) e intensificar la condensación sobre la cubierta. En estos invernaderos, el agua de condensación de la cubierta puede caer sobre la pantalla y si esta es cerrada no porosa el agua se acumulará sobre ella siendo necesario disponer de algún sistema para evacuarla (pantalla en pendiente o realizar perforaciones en la misma en zonas sin cultivo). Si la pantalla es porosa puede absorber el agua de condensación caída desde la cubierta si esta no es muy abundante y evitar que gotee sobre el cultivo, pero si la caída de agua de condensación es abundante la pantalla no evitará que llegue al cultivo. Por otro lado, sobre la pantalla no se formará normalmente condensación al presentar mayores temperaturas que la cubierta exterior del invernadero. Hernández y col. (2017) encontraron que el uso de una pantalla impermeable de polietileno redujo la humedad relativa del aire situado entre el cultivo y la pantalla un 5% en el periodo frío, respecto al invernadero sin pantalla, y que no se produjo condensación sobre la pantalla dado que su temperatura fue unos 2°C más alta que la temperatura de la cubierta.

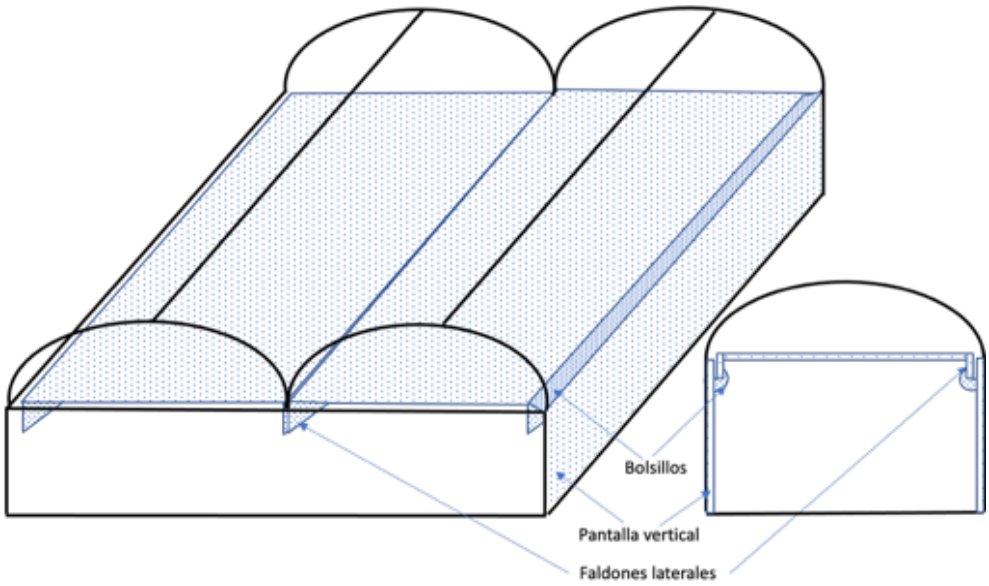


Figura 4. Esquema de invernadero dotado de pantallas térmicas verticales y sistemas para aumentar el aislamiento (faldones y bolsillos).

En invernaderos con calefacción activa, bajo las pantallas, las condiciones de humedad no se ven modificadas (Kittas y col., 2003; Brajeul y col., 2005). En los invernaderos con sistemas activos de calefacción el objetivo de las pantallas térmicas no es aumentar la temperatura (lo hace la calefacción), sino minimizar las pérdidas energéticas y reducir el volumen de aire a calentar, lo que disminuye el consumo de energía (Levit y Piacentini, 1994; Öztürk y Basçetinçelik, 1997; Frangi y col., 2011). El ahorro energético de los costes de calefacción, que se ha cifrado entre un 20 y un 60% dependerá de las condiciones climáticas, del tipo de invernadero, de las propiedades y el manejo de la pantalla (Sethi y Sharma, 2008; Ahamed y col., 2019) y de su adecuada instalación. Dado este ahorro, se ha generalizado su uso en invernaderos calefactados al conseguir amortizarse en poco tiempo (Vadiee y Martin, 2014). De Zwart y col. (2018) desarrollaron un modelo que permite realizar balances energéticos en estado estacionario de invernaderos con pantallas térmicas en zonas templadas. El modelo permite predecir el perfil de temperatura vertical, la temperatura de la cubierta vegetal a distintas alturas y el consumo de combustible en función de las condiciones externas. Para facilitar el uso del modelo crearon una sencilla aplicación web que permite analizar escenarios usando una base de datos de diversos materiales (http://www.glastuinbouwmodellen.wur.nl/radiationmonitor/?user=Greensys_ENC). La Figura 5 muestra el perfil de temperaturas del aire y del cultivo para las mismas condiciones ambientales externas durante una noche despejada y una noche nublada en un invernadero con calefacción (tuberías bajo el cultivo) y una pantalla térmica semitransparente con un nivel de ahorro de energía del 45%, según el fabricante. En la noche despejada la temperatura de cielo es muy baja (-10,7 °C) y el balance de radiación de onda larga en la cubierta del invernadero es muy negativo. El material de cubierta se enfría y toma energía por convección del aire

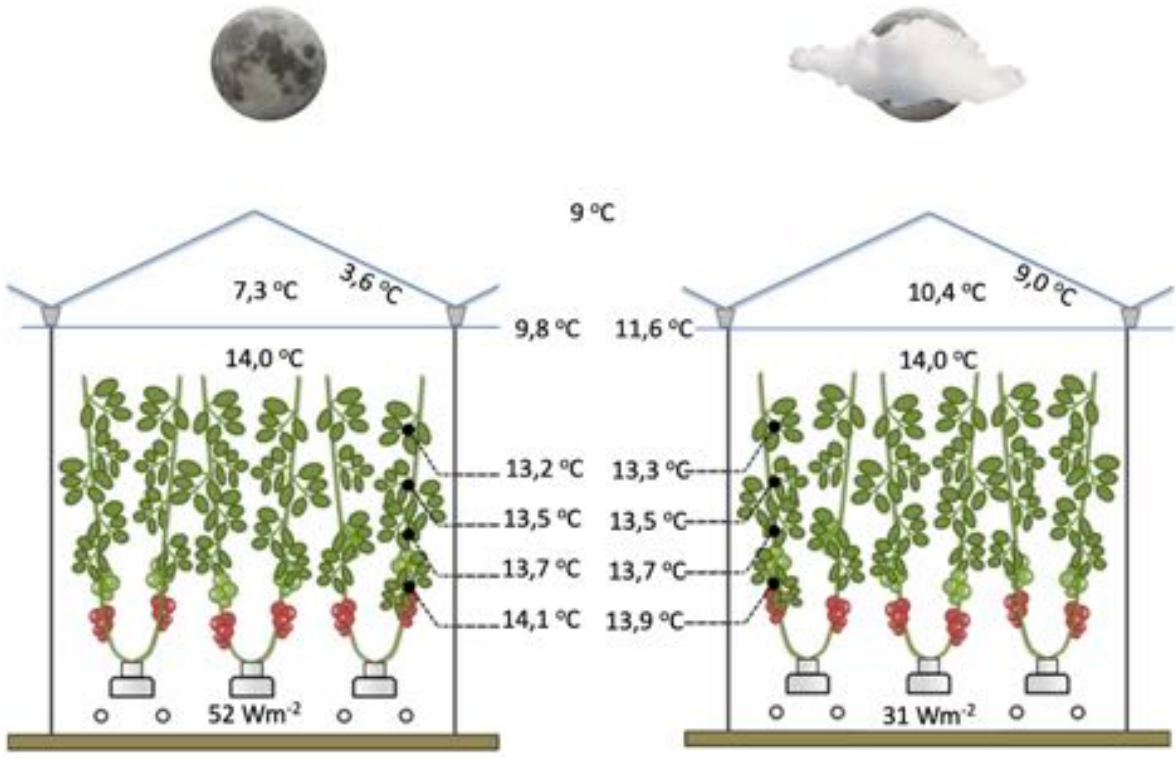


Figura 5. Simulación de temperaturas realizadas con el modelo de De Zwart y col. (2018) para una noche despejada (izquierda) y una cubierta (derecha).

próximo, que lo tomará a su vez de la pantalla. Bajo la pantalla se mantiene la temperatura de consigna (14ºC) con la calefacción, pero con un elevado consumo energético (52 W m^{-2}). En la noche nublada (temperatura de cielo de +5ºC) el balance radiativo es menos negativo, la temperatura de cubierta, del aire de la cámara superior y de la pantalla son más altas, y el consumo de energía es sustancialmente menor (31 W m^{-2}).

3. Productividad de los cultivos en invernaderos pasivos

El uso de pantallas térmicas en invernaderos pasivos al mejorar ligeramente el microclima del invernadero, puede afectar positivamente a la productividad y calidad de los cultivos, pero su uso es muy limitado y apenas hay información al respecto. En Almería, Meca y col. (2003), en un cultivo de pepino de octubre a febrero, no obtuvieron ninguna mejora productiva con el uso de una pantalla aluminizada. Sin embargo, con un ciclo similar y la misma pantalla López y col. (2003) indicaron que se producía un incremento de producción del 15% con respecto al invernadero control sin pantalla. En un cultivo de melón con trasplante en enero, Hernández y col. (2017) utilizando una pantalla de polietileno de 37 micras de espesor consiguieron adelantar significativamente las cosechas, se mejoró la calidad del fruto incrementando el contenido en sólidos solubles en un 13% y se redujo la incidencia del mildiu en comparación con un invernadero sin pantalla. En una zona con inviernos suaves de Turquía, Abak y col. (1994) indicaron que una pantalla de polietileno aumentó la producción de

tomate un 19% y una de poliéster aluminizado un 20%.

4. Gestión de las pantallas

Lo usual es que la gestión de la extensión-recogida de las pantallas se realice de modo automatizado siguiendo una o varias de las siguientes estrategias: i) Consigna horaria; ii) Umbral fijo de radiación; iii) Correlación entre la radiación solar y la temperatura exterior; iv) Criterios económicos basados en energía ahorrada y pérdidas de cosecha; v) Balance energético en la cubierta del invernadero (Bastien y Athienitis, 2012). La primera estrategia es la más simple y requiere únicamente fijar una hora por la tarde (cercana al ocaso) para iniciar el despliegue y una hora por la mañana (cercana al amanecer) para la retirada. Retrasar la retirada de la pantalla puede generar ahorros de consumo de energía importantes. Gilli y Camps (2012), en un invernadero tipo venlo en Suiza, demostraron que retrasar la retirada una hora tras el amanecer produjo un ahorro energético entre el 23 y el 27% en un cultivo de tomate sin reducir la producción. Por ello, hay que establecer un umbral de radiación que no genere pérdidas productivas o que genere un ahorro energético que las compense. Dieleman y Kempkes (2006), en un cultivo de tomate en un invernadero tipo venlo en los Países Bajos, encontraron que la recogida de la pantalla térmica cuando la radiación global exterior era de 50 W m^{-2}, en lugar de 5 W m^{-2}, no afectó a la producción pero redujo el consumo energético un 3,5%. Además, mediante un modelo analizaron la influencia de consignas desde 1 a 150 W m^{-2} obteniendo los mejores resultados económicos con la consigna de 50 W m^{-2}. El modelo también tiene en cuenta la temperatura exterior e indica el momento óptimo de retirada de la pantalla en combinación con la radiación exterior. Por ejemplo, si la temperatura exterior es de 5ºC la retirada se debe realizar cuando la radiación global sea de 65 W m^{-2} pero si la temperatura es de 10ºC hay que adelantar la retirada hasta el momento en que la radiación global sea de 18 W m^{-2}. Mediante la utilización de balances de energía se pueden conseguir los máximos ahorros al determinar los momentos en los que la energía solar equilibra la cantidad de energía que se gana o pierde con la extensión o retirada de la pantalla. Andersson (2011) evaluó la gestión de las pantallas mediante un modelo de balance de energía con un sistema de una consigna radiativa de apertura-cierre a 5 W m^{-2}. Los invernaderos gestionados con el modelo mantuvieron más tiempo las pantallas cerradas y consiguieron importantes ahorros energéticos (14% para un invernadero de vidrio y 41% en un invernadero de doble cubierta acrílica).

En los invernaderos pasivos el momento más crítico es la retirada de la pantalla al tener lugar la mezcla del aire frío situado por encima de la pantalla con el aire caliente que rodea al cultivo. Además, puede haber caída de agua sobre la pantalla si se ha producido condensación en el techo del invernadero. Por ello, con sistemas de control climático la recogida de la pantalla debe realizarse en varios pasos. Inicialmente, deben abrirse las ventanas cenitales para evacuar el aire de la zona superior y si hay condensación que esta caiga sobre la pantalla. En un segundo paso, se abren las ventanas laterales y cuando se ha

evaporado el agua de condensación la pantalla puede empezar a recogerse. Cuando se igualen las temperaturas y humedades relativas de la zona superior e inferior del invernadero puede recogerse la pantalla completamente, pero si hay diferencias importantes se debería hacer una apertura parcial. La extensión de la pantalla por la tarde es menos conflictiva y se hace en un único paso tras la puesta del sol.

Bibliografía

Abak, K., Basçetinçelik, A., Baytorun, N., Altuntas, Ö., & Öztürk, H. H. (1994). Influence of double plastic cover and thermal screens on greenhouse temperature, yield and quality of tomato. Acta Horticulturae, 366.

Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2019). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. Biosystems Engineering, 178, 9–33.

Andersson, N. E. (2011). Energy saving in greenhouses can be obtained by energy balance-controlled screens. Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science, 61(2), 176–182.

Baille, A. (1999). Energy cycle. In G. Stanhill & H. Z. Enoch (Eds.), The Greenhouse Ecosystem (pp. 265–286). Elsevier.

Baille, A., López, J. C., Bonachela, S., González-Real, M. M., & Montero, J. I. (2006). Night energy balance in a heated low-cost plastic greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology, 137(1–2), 107–118.

Bastien, D., & Athienitis, A. K. (2012). Control strategy for thermal screens in greenhouses: An algorithm based on heat balance. Acta Horticulturae, 952, 501–508.

Bonachela, S., Granados, M. R., López, J. C., Hernández, J., Magán, J. J., Baeza, E. J., & Baille, A. (2012). How plastic mulches affect the thermal and radiative microclimate in an unheated low-cost greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology, 152(1).

Brajeul, E., Lesourd, D., & Loda, D. (2005). Thermal screen evaluation in soilless cucumber crop under glasshouse. Acta Horticulturae, 691, 679–686.

De Zwart, H. F., Baeza Romero, E. J., Van Breuge, A. J., & Mohammadkhani, V. (2018). An app to quantify radiative heat loss from greenhouse crops. Acta Horticulturae, 1227, 69–76.

Dieleman, J. A., & Kempkes, F. L. K. (2006). Energy screens in tomato: Determining the optimal opening strategy. Acta Horticulturae, 718, 599–606.

Frangi, P., Piatti, R., & Amoroso, G. (2011). Evaluation of different screens for energy saving in the greenhouse. Acta Horticulturae, 893, 275–280.

García, C., Céspedes, A.J, Lorenzo, P., Pérez-Parra, J.J., Escudero, M.C., Medrano, E., Baeza, E., López, J.C., Magán, J.J., Fernández, M.D., Parra, S., Gázquez, J.C., García, R., Pérez, C. (2016). El sistema de producción hortícola de la provincia de Almería. Eds: M.C. García; A. J. Céspedes; J.J. Pérez-Parra; P. Lorenzo. Ed. IFAPA. pp: 180.

Geoola, F., Kashti, Y., Levi, A., & Brickman, R. (2009). A study of the overall heat transfer coefficient of greenhouse cladding materials with

thermal screens using the hot box method. Polymer Testing, 28(5), 470–474.

Geoola, F., Kashti, Y., Teitel, M., Levi, A., Brickman, R., & Esquira, I. (2011). A study of U value of greenhouse films with thermal screens using the hot box method. Acta Horticulturae, 893, 367–372.

Gilli, C., & Camps, C. (2012). Influence of two different thermal screen managements on yield, quality and energy consumption of a soilless tomato culture. Acta Horticulturae, 952, 97–102.

Hemming, S., Romero, E. J. B., Breugel, A. J. va., & Mohammadkhani, V. (2018). A method to quantify the energy-saving performance of greenhouse screen materials. Acta Horticulturae, 1227, 221–229.

Hernández, J., Bonachela, S., Granados, M. R., López, J. C., Magán, J. J., & Montero, J. I. (2017). Microclimate and agronomical effects of internal impermeable screens in an unheated Mediterranean greenhouse. Biosystems Engineering, 163, 66–77.

Hüseyin Öztürk, H., & Basçetinçelik, A. (1997). The nocturnal heat loss and internal temperatures in plastic tunnel greenhouses with thermal screens. In Acta Horticulturae (Vol. 443, pp. 79–84).

Kittas, C., Katsoulas, N., & Baille, A. (2003). Influence of aluminized thermal screens on greenhouse microclimate and night transpiration. Acta Horticulturae, 614, 387–392.

Levit, H. J., & Piacentini, R. D. (1994). Greenhouses Heating by the Simultaneous Use of Thermal Screens and Underground Pipes. In Acta Horticulturae (Issue 357, pp. 335–341).

López, J.C., Pérez, C., Pérez-Parra J., Cabrera, F. J. (2003). Evaluación de dos sistemas de ahorro de energía para un cultivo de pepino en invernadero "parral". X Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas, 392–394.

Meca, D., López-Hernández, J.C., Gázquez, J.C., Pérez-Parra, J. (2003). Evaluación de dos pantallas de ahorro de energía para un cultivo de pepino en invernadero. En 2° Congreso Nacional de Agroingeniería. Cordoba. España (pp. 251–252).

Montero, J. I., Muñoz, P., Sánchez-Guerrero, M. C., Medrano, E., Piscia, D., & Lorenzo, P. (2013). Shading screens for the improvement of the night-time climate of unheated greenhouses. Spanish Journal of Agricultural Research, 11(1), 32–46.

Munar, E. A. V., & Aldana, C. R. B. (2019). Numerical evaluation of passive strategies for nocturnal climate optimization in a greenhouse designed for rose production (Rosa spp.). Ornamental Horticulture, 25(4), 351–364.

Piscia, D. (2012). Analysis of night-time climate in plastic-covered greenhouses. *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). 142 pp.

Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Solar Energy, 82(9), 832–859.

Shenderey, C., Vitoshkin, H., Barak, M., & Arbel, A. (2020). Multilayer Thermal Screens for Greenhouse Insulation. International Journal of Mechanical and

Industrial Engineering, 14(12), 498–501.

Tantau, H. J., & Akyazi, G. (2017). The low energy greenhouse - Heat transfer by long wave radiation. Acta Horticulturae, 1170, 847–853.

Teitel, M., Barak, M., & Antler, A. (2006). Greenhouse heating and determination of nocturnal heat loss. Acta Horticulturae, 718, 263–269.

Vadiee, A., & Martin, V. (2014). Energy management strategies for commercial greenhouses. Applied Energy, 114, 880–888.

Vitoshkin, H., Barak, M., Shenderey, C., Haslavsky, V., & Arbel, A. (2019). Improving greenhouse insulation through multilayer thermal screens using the hot box method. Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering, 8–11.

Mangas de agua

María Cruz Sánchez-Guerrero[1], Pablo Fernández-del Olmo[1], Esteban José Baeza[2], Evangelina Medrano[1]

[1]IFAPA “La Mojonera”

[2]Future Farms S.L.

1. Definición, tipos y descripción

Entre las técnicas de calefacción pasivas adaptadas al modelo productivo de invernadero mediterráneo, se encuentra la utilización de mangas de agua como colectores solares (von Zabeltitz, 1989; Photiades, 1994).

Ubicadas sobre el suelo, junto a la línea de cultivo, las mangas de agua aumentan la inercia térmica del invernadero, actuando durante el día como captadores de energía solar, absorbiendo radiación, y aportando durante la noche por convección natural y radiación, energía en forma de calor (Figura 1).

El fluido caloportador comúnmente utilizado es agua, por su eficiencia en la transferencia de calor, bajo coste económico (no sólo de implantación, sino también de mantenimiento), seguridad y respeto al medio ambiente. Es posible incorporar aditivos que potencien determinadas propiedades térmicas (Woolston, 1985; Taieb y Grafiadellis, 1993), si bien, es importante considerar que estos aditivos no puedan suponer una fuente de contaminación del suelo en el caso de que se dañaran las mangas.

Las mangas solares pasivas, similares a las empleadas en muchos invernaderos con calefacción para distribuir aire caliente, pueden fabricarse con film semi-transparente fotoselectivo, generalmente polietileno (PE) (Figura 2A y 2B). La fotoselectividad consiste en que el material contiene aditivos para absorber un elevado porcentaje de la radiación infrarroja cercana (NIR) que incide sobre las mangas y de esta forma, por convección, incrementar la temperatura del agua contenida en su interior, lo que supone una mejora en términos energéticos en comparación con un plástico estándar no fotoselectivo al NIR. También puede ser empleado polietileno negro, bien en la propia manga o en un film para cubrirla íntimamente (Figura 2C), con objeto de aumentar la absorción de radiación solar (Grafiadellis y col., 1990; Bazgaou y col., 2020) y PVC semi-transparente (Murakami y col., 1984). Si bien Grafiadellis y col. (1990) al testar diferentes tipos de plástico (PEuv, PE negro, PE simple y EVA) encuentran al PE simple como el material más apropiado para las mangas de agua.

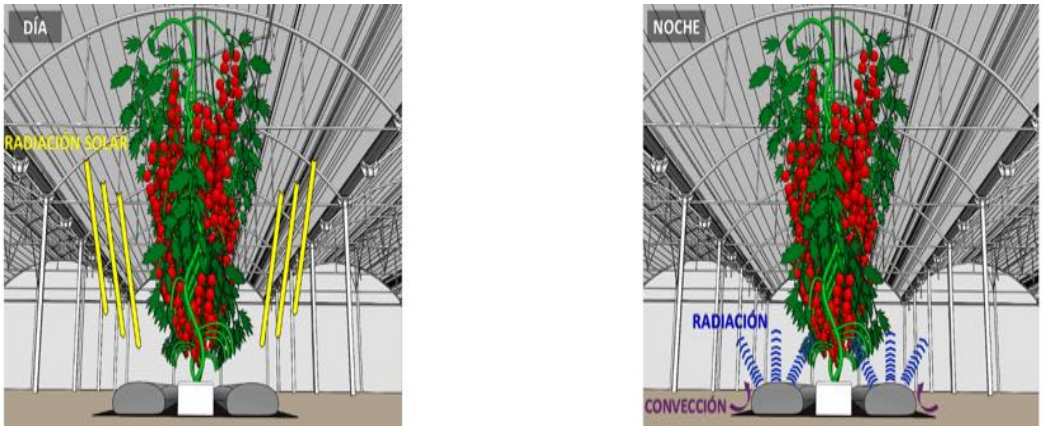


Figura 1. El agua en la manga se calienta durante el día y emite el calor acumulado por la noche al aire.

Figura 2. A) y B) Mangas de agua fabricadas con polietileno semi-transparente fotoselectivo (fuente propia) C) Mangas de agua fabricadas con polietileno negro (fuente: Bazgaou y col., 2020).

La capacidad térmica del sistema viene determinada fundamentalmente por las dimensiones de la manga, la cual adopta una geometría cilíndrica imperfecta (ligeramente aplanada) cuando se encuentra colmada de agua. Aunque el aumento del volumen de agua de las mangas permitiría mejorar la eficiencia del sistema de calefacción solar pasivo, el obstáculo que supone al paso de trabajadores y de maquinaria limita el diámetro de las mangas utilizadas, que según Gourdo y col (2019) no debe exceder los 32 cm. Santamouris y col. (1994) describieron en una revisión sobre tecnologías de calefacción de invernaderos algunas características de los sistemas de mangas de agua como el espesor, entre 180 y 250 μm, y las dimensiones, con diámetro entre 23 y 35 cm (60-70 L de agua por metro manga) y la longitud entre 2 y 12 m; no obstante, el sistema se ha

implementado adecuadamente con mangas de 50 cm de diámetro (Baeza y col., 2017) y de hasta 20 m de longitud (Sánchez-Guerrero y col., 2020). Las mangas de agua suelen cubrir el 20-40% de la superficie del suelo, requiriendo 20-40 L m^{-2} de superficie de invernadero.

Siempre que la disposición del cultivo en el invernadero lo permita y no se dificulte la realización de las tareas agrícolas, es recomendable colocar una manga a cada lado del cultivo (Grafiadellis y col., 1990; Grafiadellis y Traka-Mavrona, 1999) y sobre un plástico celular de polipropileno negro para tratar de evitar, por una parte, que el film se pudiera perforar al estar en contacto con la arena o la grava, y por otra, ofrecer un cierto aislamiento térmico de la transmisión de calor hacia el suelo y que a su vez impide la reflexión y posible pérdida de la radiación incidente.

El coste del sistema contemplando la colocación de polipropileno negro en la base de la manga se sitúa entre los 0,25 y los 0,33 € m^{-2}.

2. Microclima

La respuesta de la temperatura y humedad del aire de un invernadero frente al uso de un sistema de calefacción pasiva de mangas de agua depende de la capacidad de acumulación pasiva de calor en el sistema y está influenciada por las condiciones exteriores, así como por las características del invernadero (tamaño, material de cubierta, infiltración y el tipo de cultivo).

En Almería se ha evaluado el efecto del almacenamiento de calor de mangas de agua con diferente longitud (L) y diámetro (D) ubicadas en un invernadero tipo parral (L=12,5 m, D=0,5 m) y en un invernadero multitúnel (L=21,5 m, D=0,25 m), durante meses fríos, en un cultivo de pimiento (2017/18). La oscilación térmica en el agua de las mangas fue similar en ambos sistemas (Figura 3), aunque ligeramente mayor en las mangas de menor D; el incremento en la temperatura del agua (ΔT_{agua}) fue por término medio de 3,6ºC en el invernadero parral y 4ºC en el multitúnel. Se encontró una relación lineal entre la radiación global (RG) diaria dentro de invernadero multitúnel y el ΔT_{agua} máximo diario (Figura 4), lo que pone de relieve el interés de este sistema pasivo en el área mediterránea con alta incidencia de radiación. En este sentido, Baeza y col. (2014) muestran diferencias en la cantidad de calor almacenada en el agua entre mangas situadas en el Norte o Sur de un invernadero con orientación E-O, que atribuyen a su mayor intercepción de radiación. No obstante, Photiades (1994) indica que además de la radiación solar directa, el agua en las mangas recibe calor del ambiente del invernadero.

Diversos estudios se han llevado a cabo sobre la aplicación de este sistema de calefacción pasiva en condiciones mediterráneas. Grafiadellis y col. (1990) refieren aumentos de la temperatura del aire, del suelo y de la planta del orden de 3–5ºC con el uso de bolsas de agua como acumuladores de calor y dentro del mismo rango (2,5-4ºC) se encuentran los valores recogidos por Santamouris et al. (1994) en su revisión del efecto de este sistema pasivo sobre la temperatura mínima del aire durante los meses de invierno. Así mismo, aumentos de la temperatura mínima en el aire del invernadero respecto al exterior de hasta 5ºC fueron obtenidos por Photiades (1994). Sin embargo,

Mavrogianopoulos y Kyritsis (1993) y Adillón (2015) consiguieron aumentos de tan solo 1ºC respecto a un invernadero control usando mangas de PE transparentes. En Marruecos, Gourdo y col. (2019) obtuvieron una mejora de la temperatura nocturna del aire de hasta 3,1ºC con el uso de mangas de polietileno negro.

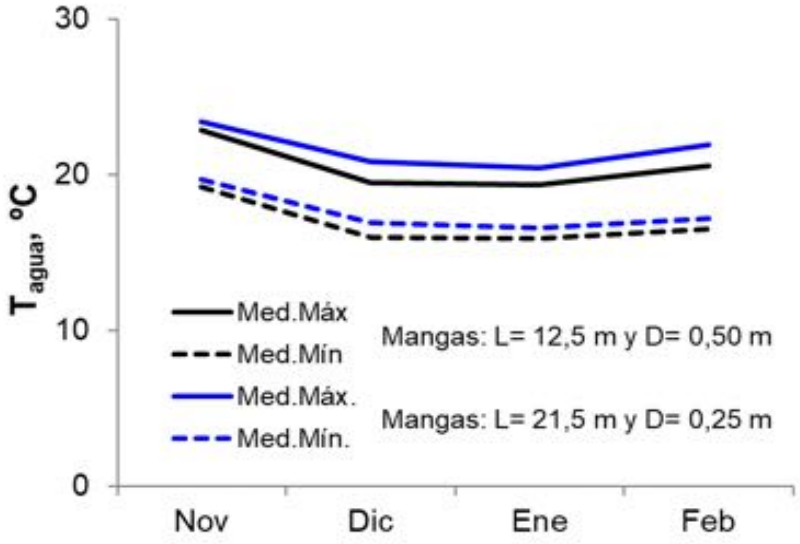


Figura 3. Media mensual de las temperaturas del agua (T_{agua}) máximas y mínimas registradas en el interior de mangas de polietileno de distintas dimensiones (longitud, L y diámetro, D), durante el periodo frío de un ciclo de cultivo de pimiento (2017/18) en invernadero parral (L=12,5 m y D= 0,50 m) y multitúnel (L= 21,5 m y D= 0,25 m).

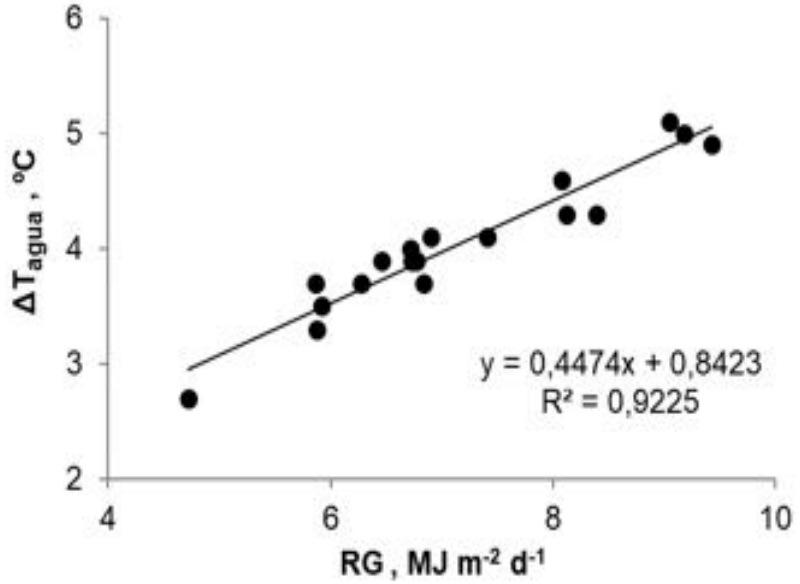


Figura 4. Relación entre la radiación global (RG) diaria dentro de invernadero multitúnel y el aumento máximo diario de la temperatura del agua (ΔT_{agua}) dentro de mangas plásticas de L=21,5 m y D=0,25 m. Datos medios semanales (Sánchez-Guerrero y col., 2020).

En condiciones de Almería, se evaluó, en invernadero tipo parral, el efecto del sistema de mangas de agua sobre la temperatura del aire, en comparación con otro invernadero de referencia idéntico sin acumuladores de calor, durante dos ciclos de cultivo de pimiento de otoño/invierno (Baeza y col., 2014; Baeza y col., 2017; Sánchez-Guerrero y col., en prensa). La Figura 5 muestra el comportamiento térmico del agua en las mangas y del aire en el invernadero a lo largo de diferentes días del cultivo en 2017/18. Después de alcanzar la máxima acumulación térmica en el agua de las mangas (con desfase respecto a la temperatura del aire debido a la mayor inercia térmica del agua), conforme se reduce la temperatura del aire se genera un gradiente térmico agua-aire que favorece la emisión de calor desde las mangas aumentando la temperatura nocturna del aire en el invernadero con respecto al del de referencia. En ambos ciclos de cultivo se puso de manifiesto el efecto positivo del sistema como calefacción pasiva, proporcionando en los periodos fríos aumentos térmicos nocturnos del aire frente al invernadero de referencia, con valores medios y máximos mensuales en los rangos de 0,8-1,8ºC y 1,7-3,1ºC, respectivamente (Cuadro 1). En cuanto a las temperaturas mínimas, el incremento medio osciló entre 1 y 2,5ºC en el ciclo 2014/15 (Baeza y col., 2017) y entre 1,1 y 2ºC en el ciclo 2017/18 (Sánchez-Guerrero y col., en prensa). Este efecto, aunque discreto, supone una ventaja interesante en los periodos fríos en los que las temperaturas nocturnas fueron inferiores a 12ºC y, por tanto, subóptimas para el desarrollo y la producción de los cultivos (Lorenzo, 2012). Se constató que el incremento en la temperatura mínima, en general, era mayor cuanto mayor era la radiación incidente sobre la manga durante el día anterior (Figura 6), asociado al mayor almacenamiento térmico en el agua. No obstante, se observó también alguna variación de este incremento en días con similar acumulación de calor en el agua de las mangas (Figura 6, días 21-22/11 y 23-24/02), poniendo en evidencia la incidencia de otros factores, como la tasa

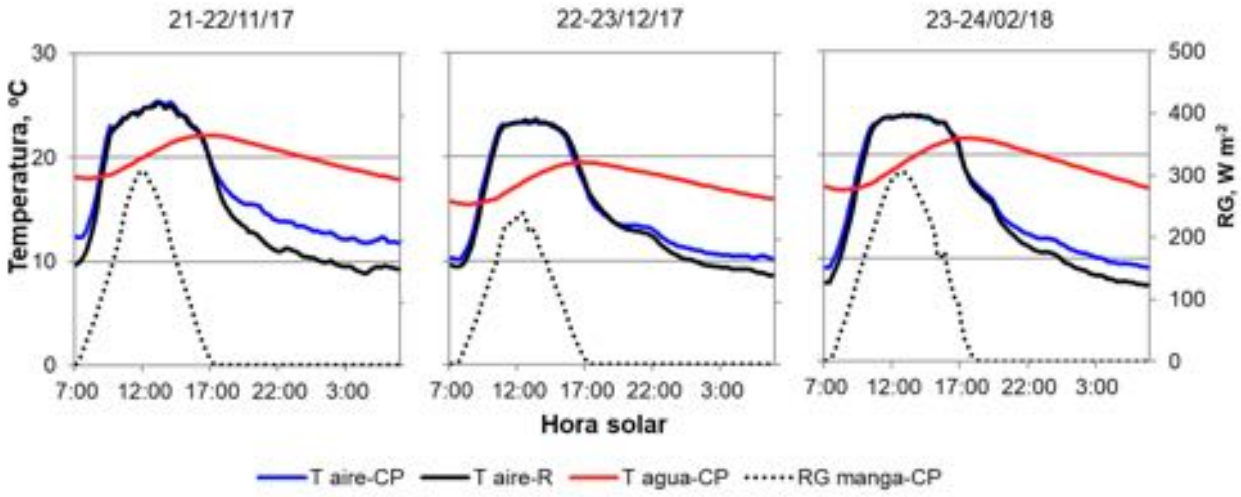


Figura 5. Evolución diaria en periodo frío del ciclo de cultivo 2017/18 de: radiación global incidente sobre las mangas de agua de la calefacción pasiva (RG manga-CP), temperatura del agua de las mangas (T agua-CP) y temperatura del aire en invernadero con calefacción pasiva (T aire-CP) y referencia (T aire-R). (Sánchez-Guerrero y col., en prensa).

	Incremento temperatura nocturna aire (ºC)			
	Medio		Máximo	
	2014/15	2017/18	2014/15	2017/18
Noviembre	0,9	1,8	2,0	3,1
Diciembre	0,8	1,0	1,7	2,1
Enero	0,9	1,1	2,3	2,7
Febrero	1,5	1,2	2,8	2,4
Marzo	1,7	----	2,9	----

Cuadro 1. Incremento térmico nocturno entre la temperatura del aire registrada en invernadero parral con mangas de agua y sin ellas durante el periodo frío en dos ciclos de cultivo. Valores medios y máximos mensuales (Datos extraídos de Baeza y col., 2014 y Sánchez-Guerrero y col., en prensa).

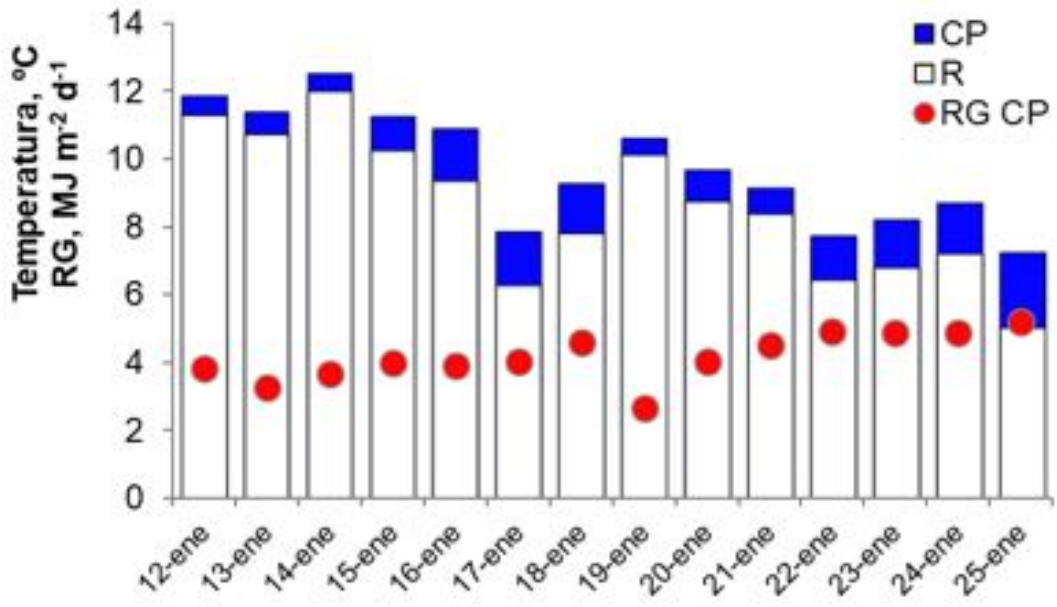


Figura 6. Radiación global incidente sobre las mangas de agua (RG CP) y temperatura del aire mínima registrada en los compartimentos con calefacción pasiva (CP) y referencia (R) en el periodo 12-15 de enero de 2015 (Baeza y col., 2014).

de ventilación/infiltración del invernadero. El sistema de mangas de agua mostró también una influencia sobre la temperatura del suelo en el invernadero parral, que fue generalmente mayor con calefacción pasiva (CP) que sin ella (R), en mayor medida durante la noche, cuando la manga emite calor (Figura 7).

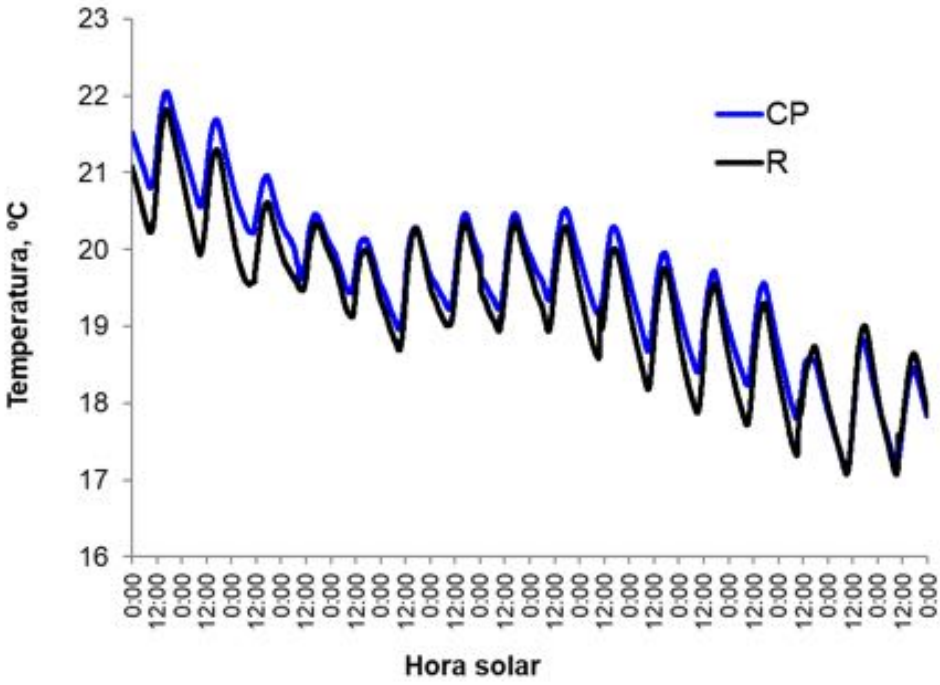


Figura 7. Evolución de la temperatura de suelo registrada en invernadero con calefacción pasiva (CP) y referencia (R) durante los días 24/11 al 9/12 del ciclo 2014/15 (Baeza y col., 2014).

3. Respuestas de los cultivos y otros aspectos agronómicos

En condiciones mediterráneas, durante los meses de otoño e invierno las temperaturas mínimas nocturnas pueden alcanzar valores entre 7 y 10ºC, e incluso inferiores en noches despejadas, donde la temperatura en el interior del invernadero es inferior a la exterior. Si bien no son temperaturas que pongan en peligro el desarrollo del cultivo, sí pueden ralentizar el desarrollo y la maduración de fruto en una época de plena producción para la zona. En este rango de temperaturas, un incremento térmico que aproxime dichas temperaturas a los 12ºC (valor mínimo por debajo del cual estas especies ralentizan el crecimiento y presentan síntomas de deterioro) puede ser beneficioso para incrementar la producción de fruto.

En Almería se evaluó el efecto de acumuladores de calor consistentes en mangas de PE rellenas de agua sobre la bioproductividad del cultivo de pimiento bajo invernadero tipo parral durante dos ciclos de cultivo (2014/15 y 2017/18) trasplantados sobre suelo enarenado en agosto y finalizados en marzo. En el ciclo 2014/15 la variedad de pimiento utilizada fue cv. Melchor y en 2017/18 cv. SV1204PB. El incremento térmico obtenido con los acumuladores de calor en cada ciclo se presenta en el cuadro 1. En ambos ciclos de cultivo se obtuvo un incremento significativo de la producción, frente a un cultivo similar sin calefacción, debido a un mayor número de frutos (Cuadro 2), aun cuando el peso medio de fruto recolectado fue mayor en el invernadero de referencia en el segundo ciclo. El incremento productivo fue de un 13% en el ciclo 2014/15 y de un 12% en el ciclo 2017/18. En cultivo de tomate se han observado incrementos productivos del 30% en condiciones climáticas de Marruecos (Gourdo y col., 2020) y del 35% en condiciones climáticas de

Ciclo cultivo	Tratamiento	Producción comercial (kg m^{-2})	Nº de frutos	Peso medio de fruto (g)
2014/15	CP	8,94	36,5	245
	R	7,96	31,8	251
	Efecto	*	**	n.s.
2017/18	CP	9.5	38.5	246
	R	8.5	32.7	259
	Efecto	**	**	**

*Cuadro 2. Producción comercial (kg m^{-2}), número de frutos por m^2 y peso medio de fruto (g) de los cultivos en los invernaderos con Calefacción Pasiva (CP) y Referencia (R). Los asteriscos indican diferencias significativas a *p≤0,05 y **p≤0,01.*

Canarias (Gourdo y col., 2019), utilizando en ambos casos mangas de PE negro.

En cuanto al efecto de la calefacción pasiva sobre la producción de materia seca, su influencia fue similar en ambos ciclos de cultivo (Cuadro 3), donde el incremento de las temperaturas mínimas debido a la calefacción pasiva favoreció la mayor producción de materia seca de la fracción generativa (FG) y no afectó a la producción de la fracción vegetativa aérea (FV) compuesta por el tallo y las hojas. No se observaron diferencias significativas en el desarrollo foliar, presentando un índice de área foliar (LAI, m^2 de superficie foliar por m^2 de suelo) similar en los dos ciclos de cultivo.

	Ciclo 2014/2015			Ciclo 2017/18		
Tratamiento	FV (g m^{-2})	FG (g m^{-2})	LAI	FV (g m^{-2})	FG (g m^{-2})	LAI
CP	441	940	1,47	371	842	1,4
R	466	837	1,34	336	726	1,6
Efecto	n.s.	**	n.s.	n.s.	**	n.s.

*Cuadro.3. Producción de materia seca de la fracción vegetativa (FV, g m^{-2}) y generativa (FG, g m^{-2}) e índice de área foliar (LAI) de los cultivos desarrollados en los invernaderos con Calefacción Pasiva (CP) y Referencia (R) en los ciclos de cultivo 2014/15 y 2017/18. Los asteriscos indican diferencias significativas a **p≤0,01.*

4. Mejoras, desarrollos o necesidades futuras

La mejora del rendimiento energético de los sistemas de calefacción pasiva basados en el uso de mangas llenas de agua en el invernadero puede seguir diversas estrategias. Intuitivamente, la primera opción sería incrementar el

volumen de agua en el invernadero, pero esta idea entra en colisión con la disponibilidad de espacio en el mismo. Por tanto, vamos a explorar otras opciones más viables:

a) Mejora de la absorción de radiación solar en el periodo diurno.
b) Mejora de la capacidad de almacenamiento térmico.
c) Mejora mediante limitación del intercambio de radiación de onda larga.
d) Mejora mediante dispositivos de bajo coste energético.

a) Mejora de la absorción de radiación solar en el periodo diurno

El espectro de radiación solar en la superficie terrestre se compone de un pequeño porcentaje de radiación ultravioleta, y radiación visible e infrarrojo cercano aproximadamente a partes iguales: de la luz que llega a la superficie de la Tierra, la radiación infrarroja representa el 49,4%, mientras que la luz visible proporciona el 42,3%.

Por otra parte, el espectro de absorción electromagnética del agua en estado líquido indica que la mayor parte de la absorción tiene lugar en el UV y en el infra-rojo cercano, mientras que la absorción en el visible es mínima (Figura 8).

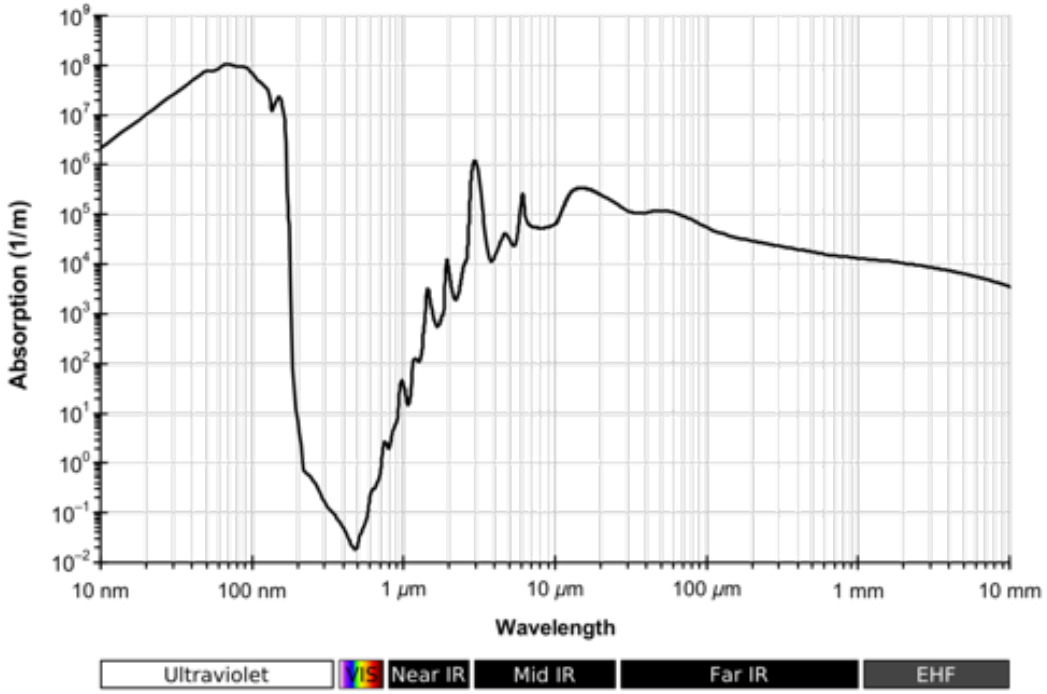


Figura 8. Espectro de absorción electromagnética del agua líquida (fuente: Kebes at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23793083).

Por tanto, una estrategia para mejorar la absorción de radiación por parte de las mangas de agua sería incrementar la absorción de energía en el visible. Esto se puede conseguir de dos maneras: empleando un colorante negro en el agua, de forma que se consiga incrementar la absorción de la misma en el visible o usando un plástico negro.

Para determinar la opción más interesante, habría que realizar ensayos. En estos ensayos habría que determinar también qué concentración de colorante proporciona mejor resultado. En

principio, cabría pensar que usar un plástico negro puede proporcionar un resultado mejor, pero esto no es tan evidente. Con un color negro mejoramos la absorción de radiación solar del propio plástico, que, al calentarse, calentaría el agua por convección, pero parte de este calor se emitiría también hacia el exterior por convección y radiación si el plástico está más caliente que el ambiente, lo cual ocurriría prácticamente siempre durante el periodo diurno de almacenamiento. Con el colorante, es el agua la que absorbe la radiación solar, y dependiendo de su concentración, el agua podría o no incrementar su temperatura por encima de la temperatura ambiente. En este sentido, Taieb y Grafiadellis (1993) encontraron un incremento del 25% en la eficiencia del sistema de calefacción pasiva con la adición de color acrílico negro a razón de 4 g por 85 L de agua en las mangas.

Disponer de un plástico transparente, pero con aditivos que incrementen su absorción en el infrarrojo cercano (NIR), combinado con el uso de un colorante para el agua, podría garantizar un buen resultado también.

Para poder discernir la combinación que proporciona el mejor resultado habría que realizar ensayos, preferiblemente a escala y en condiciones controladas de laboratorio, midiendo la temperatura del agua que se alcanzaría en cada caso, como indicador de la eficiencia en la absorción de radiación. Una cámara de cultivo, que imite la evolución de la temperatura ambiente en un invernadero durante las 24 horas sería deseable, de forma que el intercambio convectivo de la manga con el ambiente exterior sea el mismo en todos los casos.

b) Mejora de la capacidad de almacenamiento térmico

Los materiales de cambio de fase (PCM, sus siglas en inglés) presentan una capacidad volumétrica de almacenamiento térmico mayor que la del agua (Cuadro 4) aunque tienen un coste más elevado.

Sistema de almacenamiento térmico	**CAPACIDAD (KWH T^{-1})**	**Potencia (MW)**	**Eficiencia (%)**	**Coste (€ KWH^{-1})**
Sensible (agua caliente)	10-50	0.001-10	50-90	0.1-10
Material de cambio de fase (PCM)	50-150	0.001-1	75-90	10-50

Cuadro 4. Parámetros típicos de sistemas de almacenamiento térmico (Sarbu y Sebarchievici, 2018).

Diversos trabajos de investigación han propuesto el uso de PCM para realizar calefacción pasiva en el invernadero. Ya en 1988, Brandstter propuso el uso de un tipo de PCM con el propósito de incorporar calefacción pasiva en un invernadero como alternativa al uso de un lecho de rocas o el agua. En muchos casos, se ensayó el sistema con éxito, en invernaderos experimentales pequeños, sin posibilidad de extrapolar el sistema ensayado con éxito a invernaderos

comerciales de gran tamaño (ej. cubriendo la pared norte del invernadero con PCM o sistemas no pasivos que requieren de grandes caudales de circulación de aire en las unidades de almacenamiento PCM). También se ha evaluado la calefacción pasiva de la raíz usando estos materiales, con resultados dispares (Beyham y col., 2013; Llorach- Massana y col., 2017).

En particular, la mayor limitación de los PCM para tener éxito en un sistema de almacenamiento pasivo (sin tener que recurrir a la convección forzada de aire) es que la mayoría de los PCM's apropiados para su uso en invernadero tienen un pobre coeficiente de transmisión de calor por conducción, con lo cual, el proceso de cambio de fase inducido por la convección natural y radiación es poco eficiente.

Una posible solución podría ser incorporar PCM encapsulados para aumentar la capacidad de almacenamiento térmico por unidad de volumen. El encapsulamiento de los PCM para mejora del almacenamiento térmico ha sido propuesto por diversos autores, y se revisa en el trabajo de Sivasamy y col. (2018). Esta solución se conoce como PCS (Phase Change Slurry) y se han probado para uso residencial.

Otra solución interesante es crear emulsiones del PCM en el agua, usando PCM nanoencapsulados (Agresti y col., 2019) con incrementos espectaculares de la capacidad de almacenamiento térmico del 40%.

c) Mejora mediante limitación del intercambio de radiación de onda larga

Cuando llega el periodo nocturno, el calor almacenado en el agua durante el día empieza a ser transferido por radiación a todas las superficies más frías, por convección al aire del invernadero y por conducción al suelo.

Para limitar las pérdidas conductivas, basta con ubicar las mangas sobre un material aislante que las separe del suelo.

El intercambio de calor que nos interesa es el radiativo entre las mangas y las plantas y el convectivo entre las mangas y el aire del invernadero que está más frío. Sin embargo, hay un componente del intercambio radiativo que nos interesa minimizar, y que es el intercambio entre las mangas y el cielo. El sistema más empleado para minimizar las pérdidas de radiación al cielo en un invernadero son las pantallas térmicas. Lo ideal es que la pantalla empleada disponga en su lado superior de una muy baja emisividad, ya que en la cara inferior se puede producir condensación, por lo que el agua absorbería la radiación de onda larga y anularía el efecto de la baja emisividad en esta cara.

d) Mejora mediante dispositivos de bajo coste energético

Esta estrategia puede ser variada. Lo más sencillo y ya propuesto por diversos autores, sería usar ventiladores durante el periodo nocturno para incrementar el intercambio convectivo entre las mangas y el aire del invernadero. Algunos autores han propuesto que esto se consiga soplando el aire dentro de mangas de plástico perforadas y situadas encima de las mangas de agua (Katsoulas et al., 2011; Ntinas et al., 2017).

Otra posible opción sería hacer circular en un circuito cerrado el agua de las mangas por colectores solares sencillos situados fuera del invernadero para captar energía tanto de forma pasiva en el

invernadero, como en los colectores exteriores. Este sistema difiere de un sistema de calefacción estándar basado en colectores solares en que el volumen de agua a calentar sería menor y limitado al almacenado en las mangas, con lo que la superficie de paneles colectores necesarios sería sensiblemente menor. Cada bolsa tendría una toma y una entrada de agua.

Bibliografía

Adillón, M. (2015). Mejora del clima nocturno de los invernaderos mediterráneos con bolsas de agua. Trabajo Fin de Grado de Física. Universidad de Barcelona. 34 pp.

Agresti, F., Fedele, L., Rossi, S., Cabaleiro, D., Bobbo, S., Ischia, G., Barison, S. (2019). Nano-encapsulated PCM emulsions prepared by a solvent-assisted method for solar applications, Solar Energy Materials and Solar Cells, 194: 268-275.

Baeza, E.J., Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Sánchez, M.J., Porras, M.E., Torrecillas, M. (2014). Influencia de un Acumulador de Calor Pasivo sobre el Microclima y la Bioproductividad bajo Invernadero. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. 1-18 pp. Formato digital (e-book).

Baeza, E.J., Medrano, E., Sánchez-Guerrero, M.C., Sánchez-González, M.J., Porras, M.E., Giménez, M., Lorenzo, P. (2017). An alternative to conventional fossil fuel heating systems: water filled passive NIR absorbing polyethylene sleeves. Acta Horticulturae., 1170, 765-772.

Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Elame, F., Ezzaeri, K., Gourdo, L., Wifaya, A., Demrati, H., Tiskatine, R., Bekkaoui, A., Aharoune, A., Bouirden, L. (2020). Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse, Solar Energy, 198, 8-24.

Beyhan, B., Paksoy, H., Daşgan, Y. (2013). Root zone temperature control with thermal energy storage in phase change materials for soilless greenhouse applications, Energy Conversion and Management, 74, 446-45.

Brandstetter, A. (1988). Phase change storage for greenhouses, Advances In Solar Energy Technology,Pergamon, Editor(s): W.H. Bloss, F. Pfisterer. Pages 3353-3357.

Gourdo, L., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Ezzaeri, K., Bazgaou, A., Wifaya, A., Demrati, H., Bekkaoui, A., Aharoune, A., Poncet, C., Bouirden, L. (2019). Heating canarian greenhouse with a passive solar water–sleeve system: Effect on microclimate and tomato crop yield. Solar Energy, 188, 1349–1359.

Gourdo, L., Fatnassi, H., Achgar, K., Chraibi, A., Ouaddich, B., Wifaya, A., Bouharroud, R., Demrati, H., Bekkaoui, A., Aharoune, A. and Bouirden, L. (2020). Performance of a passive solar heating system in multi-span Moroccan greenhouse. Acta Horticulturae. 126, 211-218.

Grafiadellis, M., Spanomitsios, G. and Mattas, K. (1990). Recent developments introduced in the passive solar system for heating greenhouses. Acta Horticulturae., 263, 111-119.

Grafiadellis M., Traka-Mavrona E. (1999). Heating greenhouses with solar energy -new trends and developments. In: Choukr-Allah R. (ed.). Protected cultivation in the Mediterranean region. Paris: CIHEAM / IAV Hassan II, p. 119-134.

Katsoulas, N., Kittas, N., Feidaros, D.; Batrzanas, T., Baxevanou, K. (2011). Study of a passive solar heating greenhouse crop grow gutter. Acta Horticulturae, 893, 381-388.

Llorach-Massana, P., Peña, J., Rieradevall, J., Montero, J.I. (2017). Analysis of the technical, environmental and economic potential of phase change materials (PCM) for root zone heating in Mediterranean greenhouses. Renewable. Energy, 103, 570-581.

Lorenzo, P. (2012). El cultivo en invernadero y su relación con el clima. En: Innovación en estructuras productivas y manejo de cultivos en agricultura protegida. Cuadernos de Estudios Agroalimentarios. CEA 03. Edita: Fundación Cajamar. ISSN: 2173-7568. Pp: 23-44.

Mavrogianopoulos G.N., Kyritsis, S. (1993). Analysis and performance of a greenhouse with water filled passive solar sleeves. Agricultural and Forest Meteorology, 65, 47-61.

Murakami, L; Nara, M.; Sakurai, K. (1984). The efficiency of the water bag solar collector. Acta Horticulturae., 148, 707-713.

Ntinas, G.K., Fragos, V.P. and Nikita-Martzopoulou, C. (2017). Optimizing the thermal energy contribution of a solar energy storage system in a greenhouse. Acta Horticulturae, 1170, 875-882.

Photiades, I. (1994). Heating plastic greenhouses with a solar passive water-sleeve system. Miscellaneus reports 62. Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture, Natural Resources and the Environment. Nicosia, Cyprus.

Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Fernández-del Olmo, P., Lorenzo, P. (2020). Influence of a passive heating system that combines heat accumulators and thermal screen on the greenhouse microclimate. Acta Horticulturae, 1271, 41-46.

Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Fernández, P., Felipe, A., Lorenzo, P. (en prensa). Calefacción pasiva en invernadero: Respuesta sobre el clima y la producción. Actas del XLVIII Seminario de Técnicos y Especialistas en Horticultura. Santander. Junio 2018.

Santamouris, M., Balaras, C.A., Dascalaki, E., Vallindras, M. (1994). Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. Solar Energy, 53 (5), 411-426.

Sarbu, I., Sebarchievici, C. (2018). A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Sustainability, 10, 191.

Sivasamy, P., Devaraju, A., Harikrishnan, S. (2018). Review on Heat Transfer Enhancement of Phase Change Materials (PCMs), Materials Today: Proceedings, 5 (6), 14423-14431.

Taieb, F., Grafiadellis, M. (1993). Improvement of the efficiency of the passive solar heating system using colored solutions. European Seminar on Business Opportunities for Energy Technologies in the Field of

Greenhouse Horticulture in Southern Europe, Heraklion, Vol.I: 161-169.

Von Zabeltitz, C. (1989). Passive Solar Heating of Greenhouses with water-filled Polyethylene Tubes. Gartenbautechnische Informationen. Heft 30, Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover.

Woolston, S., (1985). A survey of Finnish solar greenhouse research and development. CNRE FAO Workshop in Cyprus on Solar Heating of Greenhouses", FAO.

Pequeños túneles, cubiertas flotantes y cortinas

Juan José Magán[1], Santiago Bonachela[2], Josefa López Marín[3], Gervasio Tapia[4], Marisa Rubio[5], Antonio Gil[4], Yolanda Vargas[6]

[1]Fundación Cajamar
[2]Universidad de Almería
[3]IMIDA, Murcia
[4]SAT Costa de Níjar
[5]Murgiverde
[6]UNICA-CABASC

1. Definición, tipos y características

1.1. Pequeños túneles

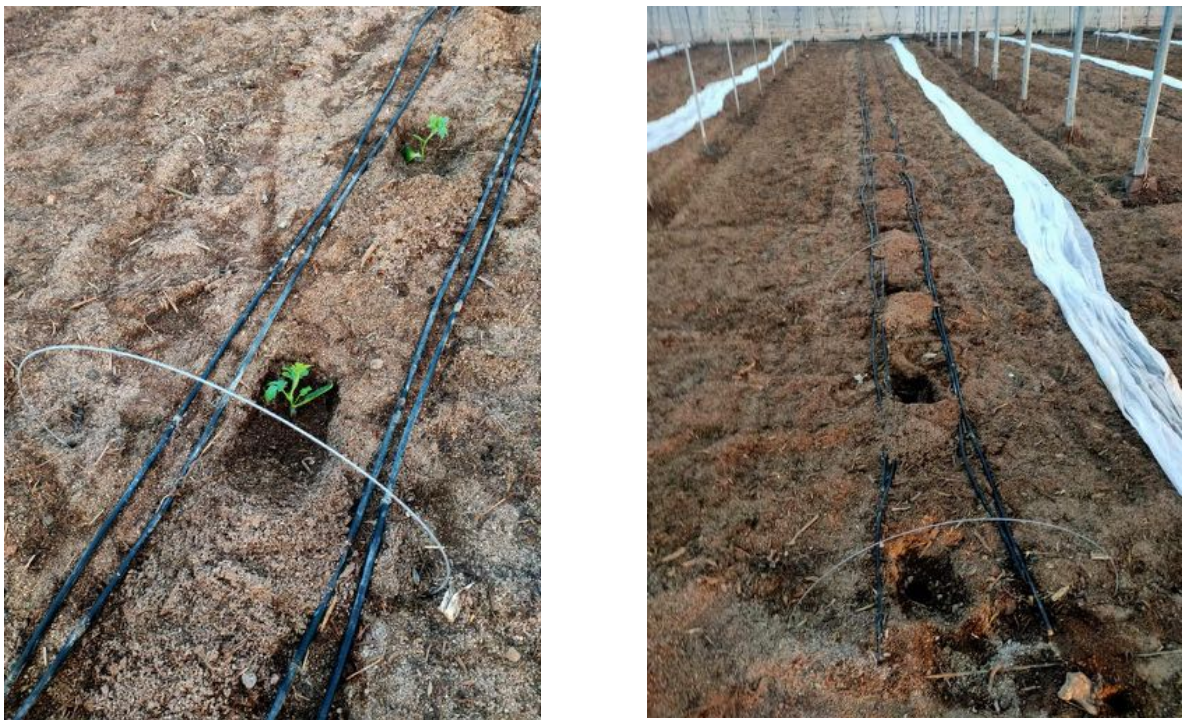
Los pequeños túneles o tunelillos (nombre popular con el que se los conoce) consisten en la colocación de un filme plástico transparente e impermeable o de una manta térmica por encima de las líneas de cultivo. Son sistemas pasivos de calefacción que se utilizan durante las primeras fases del desarrollo de los cultivos para mejorar el microclima y, con frecuencia, ganar precocidad (Fotografías 1 y 2). Además, el tunelillo reduce la entrada de plagas y agentes vectores de enfermedades, lo que resulta de gran interés para evitar la incidencia temprana de virosis que puedan comprometer la viabilidad del cultivo. En comparación con la manta térmica, el tunelillo cubierto con lámina de plástico permite conseguir una mayor temperatura, al ser más impermeable, pero aumenta el riesgo de que las plantas sufran daños en días calurosos, por lo que requiere una mayor atención por parte del agricultor. Con el fin de aumentar la temperatura dentro del tunelillo cubierto con manta térmica, este puede combinarse con un acolchado negro colocado en la superficie del suelo fuera del tunelillo (Fotografía 2).

Fotografía 1. Invernadero con un cultivo de sandía cubierto con tunelillos de plástico.

Fotografía 2. Invernaderos de sandía con tunelillos de plástico (izquierda) y tunelillos de manta térmica y acolchado plástico negro (derecha).

En los tunelillos de plástico lo más recomendable es utilizar plástico con efecto anti-goteo, que facilita que las gotas de agua que condensan sobre la cara interior del plástico resbalen por su superficie y no mojen el cultivo, lo que disminuye el riesgo de aparición de enfermedades y evita la reducción de la transmisividad del plástico a la radiación solar. Asimismo, es interesante la presencia del polímero EVA en el plástico para aumentar su termicidad, en comparación con el polietileno. Suelen utilizarse láminas plásticas con un espesor de 22,5 a 30 μm y mantas térmicas (tejido discontinuo de polipropileno) con una densidad de 17 g m^{-2}.

Para su instalación, en cada una de las líneas de cultivo se hincan los alambres en el suelo formando una semicircunferencia perpendicular a la línea de cultivo (arquillos) y sobre éstos se coloca la lámina plástica o manta térmica (Fotografía 3). En campo hay mucha variabilidad, pero se recomienda hincar los arquillos con una separación de 1,5 m cuando tienen una longitud de hasta 1,5 m. No es conveniente aumentar la separación entre ellos, ya que, en ese caso, el plástico puede pandear, incrementando el riesgo de goteo del agua de condensación sobre las plantas. Cuando se usan arquillos de 2 m, la separación entre ellos suele reducirse hasta 1 m para evitar que el plástico pandee. En los extremos de las líneas de cultivo se colocan dos arquillos formando un ángulo de 45° respecto a la línea de cultivo, para facilitar el cierre del tunelillo (Fotografía 4). Una vez extendido el plástico, se echa un puñado de tierra (arena en el caso de un suelo enarenado) sobre los bordes del plástico para fijarlo, normalmente, entre cada dos arquillos consecutivos (Fotografía 4). Para aumentar la protección del cultivo frente a plagas se suele echar un cordón de tierra a todo lo largo de ambos lados de las láminas para



Fotografía 3. Arquillos de alambre de tunelillos formando semicircunferencias perpendiculares a las líneas de cultivo.

Fotografía 4. Detalles de los extremos de los tunelillos de plástico en un invernadero parral plano.

evitar huecos. En los tunelillos cubiertos con manta térmica la instalación también se puede hacer con arquillos de alambre, que se pueden distanciar 1,5 m entre sí, incluso con arquillos de 2 m de longitud. No obstante, para reducir el coste de instalación, los agricultores que disponen de postes en los extremos de cada línea de cultivo del invernadero suelen instalar un hilo de rafia tensado a lo largo de toda la línea, a 1 m de altura, sobre el que colocan la manta térmica de 1,5 m de anchura en forma de "tienda de campaña" (Fotografía 5). Este tipo de instalación también se puede hacer con láminas plásticas, pero lo normal es que se utilice manta térmica. Existe una tendencia a aumentar la longitud de los arquillos para aumentar el volumen cubierto por el tunelillo y poder mantener el cultivo más tiempo en su interior protegido de las plagas. En la actualidad, se utilizan arquillos de hasta 2 m de longitud, aunque depende de la especie cultivada y la fecha de plantación.

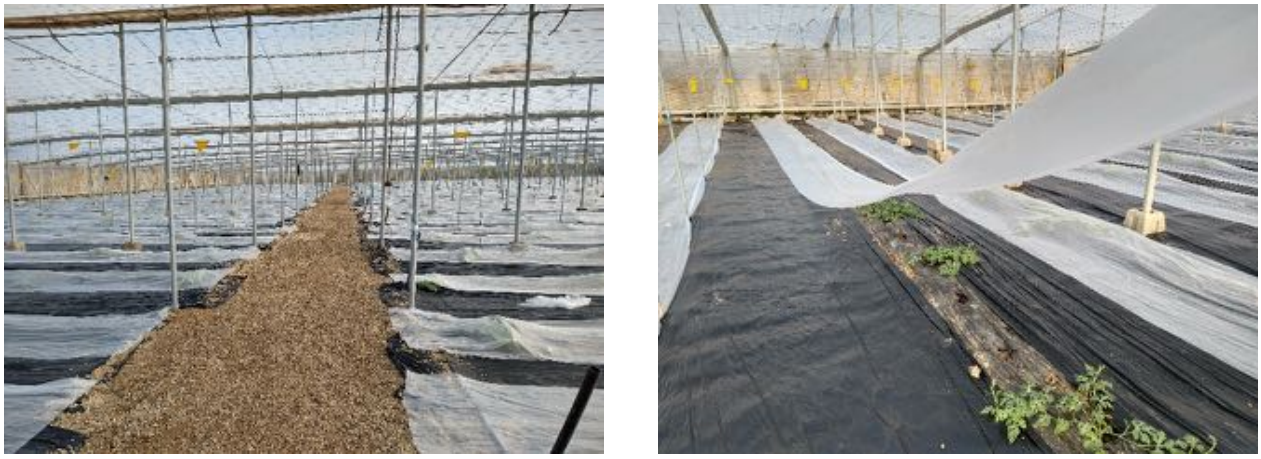
En los tunelillos de plástico, especialmente, se debe evitar que el

cultivo toque el material de cerramiento para que no se moje con la condensación y aparezcan enfermedades. La retirada del tunelillo cubierto de plástico debe ser gradual para que el cultivo se vaya aclimatando a las nuevas condiciones (la planta bajo el tunelillo suele estar muy tierna), de forma que se levanta primero uno de los lados (lo que los agricultores suelen hacer por la tarde) para ventilar y evitar temperaturas y humedades excesivas. Además, de esta forma la planta puede empezar a crecer fuera del tunelillo antes de que se retire totalmente.

Fotografía 5. Tunelillo de plástico semicircular con golpes de tierra en los bordes de las láminas (izquierda) y tunelillo de manta térmica en forma de "tienda de campaña".

1.2. Cubiertas flotantes

Otro sistema pasivo de calefacción de uso extendido en los invernaderos mediterráneos consiste en colocar la manta térmica como cubierta flotante directamente sobre el cultivo (Fotografía 6). Esta técnica es común en ciclos de



Fotografía 6. Cultivo de sandía en invernadero con cubierta flotante y acolchado negro

cultivo que comienzan en el periodo frío, como calabacín, sandía y melón, y busca básicamente proteger al cultivo de plagas y enfermedades durante los primeros 10-15 días del postrasplante, aunque pueden mantenerse más tiempo sobre el cultivo. Suelen utilizarse mantas térmicas (tejido discontinuo de polipropileno) con una densidad de 17 g m^{-2}.

1.3. Cortinas

La cortina plástica es otra técnica pasiva de calefacción que puede integrarse con los tunelillos y, sobre todo, con los dobles techos fijos en los invernaderos del litoral mediterráneo español (Fotografía 7). Consiste en láminas de plástico flexible, transparente, impermeable y preferiblemente térmico, con un espesor de unos 37,5 μm, colocadas verticalmente (a veces se usan cortinas de manta térmica), con el fin de compartimentar el volumen de aire del invernadero para reducir las pérdidas de energía, sobre todo, por convección y el movimiento del aire más caliente hacia las zonas del invernadero situadas a mayor cota. En los invernaderos mediterráneos es frecuente combinar las cortinas con el doble techo fijo para confinar el aire, aumentado el efecto térmico y la protección contras plagas y enfermedades. El uso de cortinas requiere que el agricultor esté atento a las condiciones térmicas e higrométricas que se generan en el invernadero ya que, cuando sean excesivas, es necesario levantarlas durante la mañana para facilitar la ventilación durante el periodo más cálido del día y volver a extenderlas por la tarde para ganar temperatura durante el periodo nocturno. Asimismo, es necesario levantar las cortinas a partir del momento en el que se inicia la polinización del cultivo. Cuando se combinan con el doble techo, las cortinas suelen colgar desde éste, pero, si no hay doble techo, se suelen extender desde la cubierta del invernadero para conseguir un mayor confinamiento del aire.

Las cortinas se utilizan, sobre todo, en invernaderos con pendiente o situados en zonas frías, pero no exclusivamente. Suelen instalarse en los pasillos del invernadero cada 20 a 40 m, aunque también se instalan entre pasillos e incluso pegadas a los laterales del invernadero en las zonas más frías. Para su instalación se suele utilizar el mismo tipo de plástico que para el doble techo. En algunos invernaderos localizados en zonas frías de la comarca del Poniente de Almería en ciclos extra-tempranos o extra-tardíos (siembras/trasplantes a finales de noviembre, diciembre y enero) de algunos cultivos, como el pimiento, se instalan dos dobles techos fijos de plástico por encima del cultivo durante el periodo frío. En estos invernaderos, además del doble techo en pendiente situado entre el techo del invernadero y el emparrillado de alambre de tutorado, se coloca un segundo doble techo formado por láminas plásticas horizontales unidas entre sí y apoyadas directamente sobre el emparrillado de alambre (Fotografía 8), que suelen estar ligeramente perforadas para que no se acumule el agua de lluvia o condensación. En este doble techo más bajo también se suelen colocar láminas plásticas verticales o cortinas, normalmente, en los pasillos del invernadero para mejorar las condiciones térmicas e higrométricas del cultivo. Estas cortinas se abren manualmente durante el periodo cálido del día para evitar excesos térmicos e higrométricos (Fotografía 8).

Fotografía 7. Invernaderos con dobles techos y cortinas colocadas en los pasillos (izquierda) y en los laterales (derecha).

Fotografía 8. Cultivo de pepino en invernadero con doble techo fijo en pendiente, doble techo fijo plano sobre el emparrillado y cortinas plásticas entre líneas de cultivo y en los pasillos (izquierda) y cultivo de pimiento en invernadero con doble techo fijo en pendiente, doble techo fijo plano sobre el emparrillado y cortinas plásticas en los pasillos (derecha).

2. Usos

La aplicación de estas técnicas pasivas es heterogénea en función del cultivo, la zona y la fecha de plantación (ciclo de cultivo). Por ello, se describen los usos por cultivos teniendo en cuenta la zona y los ciclos de cultivo.

2.1. Cultivo de sandía

En la zona del Poniente de la provincia de Almería lo común es que los cultivos de sandía tempranos en invernaderos parrales planos se protejan con tunelillos de manta térmica en forma de "tienda de campaña" para reducir el goteo sobre el cultivo, mientras que en los parrales de "raspa y amagado" se instalan mantas térmicas como cubiertas flotantes, manteniéndolas hasta 7 a 10 días antes de introducir las colmenas en el invernadero. En las plantaciones hasta mediados de febrero se usa manta térmica de 2 m de anchura, mientras que posteriormente es de 1,5 m, ya que lo que se busca fundamentalmente es la protección frente a plagas en la fase inicial. Las cortinas plásticas se usan de forma generalizada en plantaciones realizadas hasta finales de enero y, en algunos casos, hasta mediados de febrero, pero no en plantaciones posteriores. También es frecuente en plantaciones extra-tempranas (diciembre hasta mediados de enero) la instalación de un doble techo plano directamente sobre el emparrillado del invernadero, que se quita antes de introducir las colmenas en el invernadero.

En el Campo de Níjar (Almería), al ser una zona más fría, en general, que el Poniente, se suelen utilizar tunelillos de plástico en las plantaciones de diciembre (Fotografía 9), mientras que en las plantaciones de la primera quincena de enero se instalan tunelillos de plástico en, aproximadamente, la mitad de los cultivos y manta térmica en tunelillos o como cubierta flotante en el resto. En las plantaciones realizadas a partir de mediados de enero hasta mediados de febrero solo se usa manta térmica en tunelillos o como cubierta flotante. En las plantaciones más tempranas, realizadas antes de la segunda semana de enero, es recomendable utilizar tunelillos de 2 m de anchura para mantener el cultivo protegido más tiempo, mientras que en las posteriores se suelen usar tunelillos de 1,5 m de anchura, ya que el cultivo crece más rápido y los tunelillos de 2 m solo permitirían mantener los tunelillos unos pocos días adicionales. En cualquier caso, han de quitarse cuando el cultivo empieza a crecer rápidamente y es necesario que se extienda por toda la superficie del invernadero, de manera que no se empiece a enmarañar el cultivo debajo del tunelillo.

2.2. Cultivo de melón

En el Poniente de Almería el uso de tunelillos, cortinas y cubiertas flotantes es similar al de la sandía. Antiguamente se utilizaban tunelillos de plástico, pero hoy día es muy poco habitual. En el Campo de Níjar, a diferencia de la sandía, el melón se protege básicamente con tunelillos de manta térmica para evitar el goteo del agua de condensación, al ser más sensible al ataque de enfermedades. No se suelen enterrar los bordes de la manta en toda su longitud, sino que solo se echan puñados de tierra regularmente repartidos. La protección se mantiene hasta que el cultivo empieza a crecer rápido.

En el Campo de Cartagena (Murcia), el trasplante del cultivo de melón se realiza a partir de primeros de febrero y es muy común el uso de cubierta flotante de manta térmica. En el caso de que el melón se haya plantado después de un cultivo de calabacín también se utiliza un doble techo perforado, que se mantiene hasta finales de marzo o principios de abril.

2.3. Cultivo de calabacín

En el Poniente, el calabacín se protege durante el postrasplante en todas las fechas de plantación utilizando manta térmica como cubierta flotante. El objetivo primordial es protegerlo frente a plagas en la etapa inicial, especialmente de la mosca blanca, que transmite el virus del rizado de la hoja del tomate de Nueva Delhi (ToLCNDV). De hecho, los agricultores especializados que solo cultivan calabacín suelen crear un habitáculo a base de manta térmica dentro del propio invernadero para aumentar el aislamiento: colocan manta térmica por el interior de los laterales del invernadero y sobre el emparrillado (Fotografía 10). En plantaciones de diciembre y enero suelen instalarse cortinas plásticas intermedias para aumentar el confinamiento del aire, que se suelen quitar cuando el cultivo empieza a desarrollar los frutos.

En el Campo de Níjar, la protección del calabacín no es tan generalizada. Se usa básicamente manta térmica en plantaciones comprendidas entre finales de noviembre y mediados de febrero, bien instalada como cubierta flotante o como tunelillo (Fotografía 11). En el caso del tunelillo es recomendable utilizar

Fotografía 9. Cultivos de sandía en tunelillos de plástico de distintas anchuras en la comarca del campo de Níjar.

Fotografía 10. Cultivo de calabacín en un invernadero parral en cuyo interior se ha instalado un habitáculo de manta térmica para conseguir un mayor aislamiento contra plagas.

Fotografía 11. Cultivo de calabacín con tunelillo de manta térmica en invernadero parral plano con doble techo fijo.

Fotografía 12. Cultivo de calabacín en un parral plano bajo con doble techo de plástico en pendiente, acolchado negro y cortinas plásticas en los laterales. En la imagen de la derecha se puede observar como el doble techo fijo está abierto a la altura de las ventanas cenitales.

arquillos de 2 m de longitud para alargar el periodo de protección hasta el momento en el que debe iniciarse el desarrollo de los frutos. A pesar de que se ha llegado a observar un aumento de la precocidad de hasta 10-12 días cuando se utilizan estos sistemas de protección, hay muchos agricultores que no utilizan tunelillos o cubiertas flotantes de manta térmica, sino que cierran las ventanas del invernadero para aumentar la temperatura cuando es necesario. Pero también hay agricultores que crean un habitáculo dentro del propio invernadero para aumentar el aislamiento y evitar la condensación, como puede verse en la Fotografía 12, que muestra un cultivo de calabacín en un invernadero parral plano bajo con doble techo de plástico en pendiente, acolchado negro y cortinas plásticas en los laterales. Además, este cultivo se cubrió en sus primeras fases con una cubierta flotante de manta térmica.

En el Campo de Cartagena, las plantaciones del calabacín en invernadero se llevan a cabo en los meses de noviembre y diciembre instalando, a veces, dobles techos fijos planos perforados que se mantienen todo el cultivo e incluso posteriormente si a continuación se cultiva melón (plantación en febrero).

2.4. Cultivo de pepino

El pepino es un cultivo más típico de la comarca del Poniente. En las plantaciones de otoño se utiliza el doble techo fijo en pendiente como sistema de protección principal para evitar el goteo del agua de condensación o de lluvia sobre el cultivo y, adicionalmente, mejorar las condiciones de temperatura. No obstante, al igual que ocurre en el calabacín, en las plantaciones llevadas a cabo hasta mediados de octubre existe una tendencia creciente a construir un habitáculo de manta térmica dentro del invernadero para mejorar su aislamiento frente a las plagas y virosis. En los ciclos tempranos de primavera con plantación en enero (Fotografía 8) se combina el uso de la cubierta flotante de manta térmica, para proteger contra plagas (se quita cuando se va a amarrar el cultivo), con el doble techo fijo en pendiente (suele instalarse en otoño durante el cultivo anterior) y las cortinas plásticas, que se dejan de extender por la noche cuando el cultivo está alcanzando el emparrillado y ha desarrollado un área foliar considerable para reducir el riesgo de enfermedades.

2.5. Cultivo de tomate

En el Poniente, en las plantaciones tempranas de tomate de primavera realizadas hasta mediados de enero se instalan cortinas plásticas de forma generalizada. Además, en las plantaciones de diciembre conviene instalar adicionalmente un doble techo fijo sobre el emparrillado para mejorar las condiciones térmicas. En cambio, en las plantaciones realizadas en la segunda quincena de enero solo se usan cortinas en los invernaderos en pendiente o situados en zonas más frías. En el Campo de Níjar, el tomate de primavera no se suele proteger ya que la mayoría de las plantaciones suelen realizarse en febrero, cuando la temperatura ya no es un factor tan limitante.

2.6. Cultivo de pimiento

El pimiento es un cultivo más exigente desde un punto de vista térmico, por lo que en Almería se cultiva, sobre todo, en la zona del Poniente. En los ciclos largos tardíos con plantación a finales de agosto o septiembre, se suelen instalar en noviembre cortinas plásticas junto con el doble techo fijo en pendiente para aumentar la temperatura. Las cortinas, que tienen que ser recogidas durante el periodo diurno para ventilar, se suelen quitar a finales de febrero, mientras que el doble techo se mantiene.

En las plantaciones extra-tempranas de primavera, realizadas en los meses de noviembre y diciembre (poco habituales en la zona del Poniente), algunos agricultores combinan las cortinas plásticas con un doble techo fijo en pendiente, situado entre el techo del invernadero y el emparrillado, y otro doble techo fijo plano colocado directamente sobre el emparrillado (Fotografía 13). En estos invernaderos, el doble techo plano suele retirarse cuando se eliminan las flores del primer nudo, mientras que el doble techo en pendiente suele mantenerse hasta el final del cultivo.

En el Campo de Cartagena, el pimiento de primavera en invernadero es un cultivo extendido que se planta a partir de finales de noviembre bajo un doble techo plano perforado (para evitar la formación de bolsas de agua) colocado sobre el emparrillado, que se retira en abril. Además, se instalan cortinas plásticas en los pasillos y, en las primeras fases del

Fotografía 13. Cultivo de pimiento extra-temprano (plantado en noviembre) en un invernadero "raspa" y "amagado" bajo con doble techo fijo de plástico en pendiente, un segundo doble techo fijo plano apoyado en el emparrillado y cortinas plásticas en los pasillos.

cultivo, tunelillos de manta térmica sujetos al emparrillado del invernadero mediante hilos verticales dispuestos cada 3 m (Fotografía 14). Los tunelillos se suelen quitar a finales de febrero o principios de marzo, cuando la planta ha cuajado sus primeros frutos y tiene una altura de unos 70-80 cm.

Fotografía 14. Cultivo de pimiento en el Campo de Cartagena protegido con tunelillo de manta térmica.

3. Microclima

En general, los tunelillos, las cubiertas flotantes y las cortinas son sistemas pasivos de calefacción que normalmente aumentan la temperatura del cultivo y del aire que rodea al cultivo, al reducir las pérdidas de radiación de onda larga y las pérdidas de energía por convección del aire, ya que reducen el volumen de aire que rodea al cultivo y el intercambio de aire. Sin embargo, estos sistemas pasivos reducen la llegada al cultivo de radiación solar de onda corta.

Hay un amplio conocimiento práctico por parte de los agricultores y técnicos, basado en la experiencia, del efecto de estos sistemas pasivos de calefacción sobre el microclima de los cultivos en invernaderos mediterráneos, pero la información científica o técnica disponible es muy escasa. En invernaderos situados en el Campo de Cartagena (Murcia) se ha estudiado el uso de tunelillos de manta térmica en un cultivo de pimiento. La Figura 1 muestra la dinámica diaria de la temperatura del aire que rodea a un cultivo de pimiento plantado en enero en dos invernaderos idénticos, uno con y otro sin tunelillos de manta térmica. El invernadero con tunelillo aumentó las temperaturas máximas y, sobre todo, las temperaturas nocturnas (generalmente entre 1 y 2°C) con respecto al invernadero sin tunelillos (López-Marín y col., 2018). Sin embargo, las temperaturas de ambos invernaderos estuvieron claramente por debajo de la temperatura base del pimiento durante gran parte del periodo nocturno, sobre todo, en el invernadero sin tunelillo de manta térmica. Con respecto a la temperatura del suelo (Figura 2), los valores fueron claramente superiores en el invernadero con tunelillo con manta térmica, sobre todo, durante el periodo diurno, pero hubo lógicamente una menor fluctuación que en la temperatura del aire del invernadero, debido a la mayor inercia térmica del suelo (López-Marín y col., 2018).

La Figura 3 muestra la dinámica diaria de la temperatura del aire en un invernadero con un cultivo de pimiento trasplantado en noviembre con doble techo fijo en pendiente, doble techo fijo plano sobre el emparrillado y cortinas plásticas en los pasillos. El uso de estos tres sistemas pasivos integrados o combinados aumentó substancialmente la temperatura del aire, con respecto al exterior, durante el periodo nocturno y, sobre todo, durante el periodo diurno.

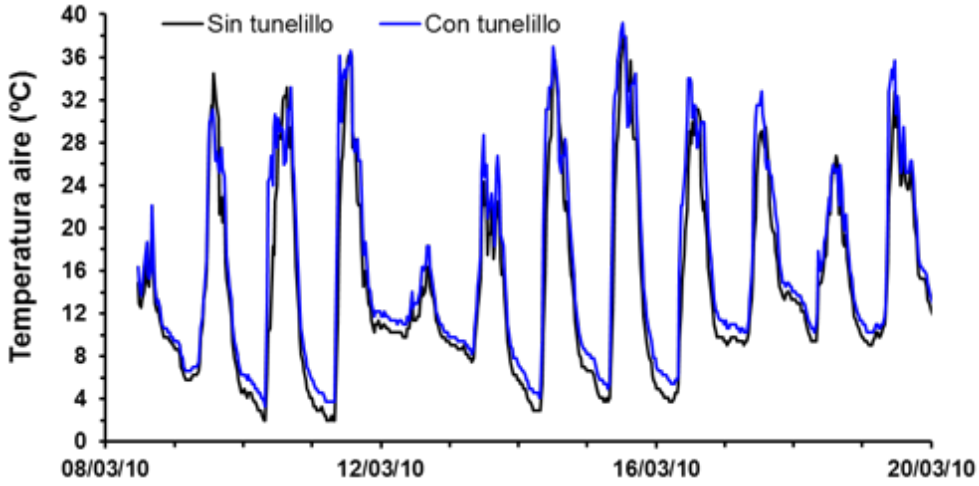


Figura 1. Dinámica de la temperatura del aire que rodea al cultivo de pimiento en un invernadero con y sin tunelillos de manta térmica. Campo de Cartagena.

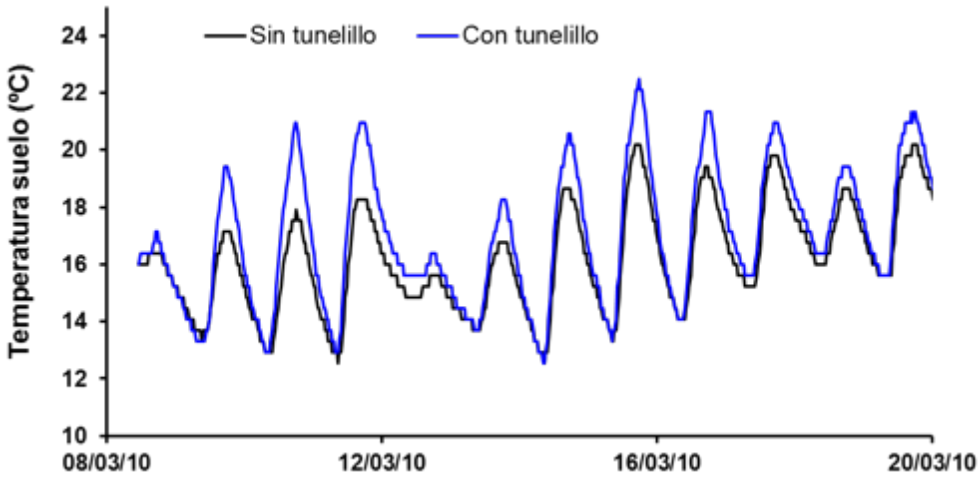


Figura 2. Dinámica de la temperatura del suelo en un cultivo de pimiento en un invernadero con y sin tunelillos de manta térmica.

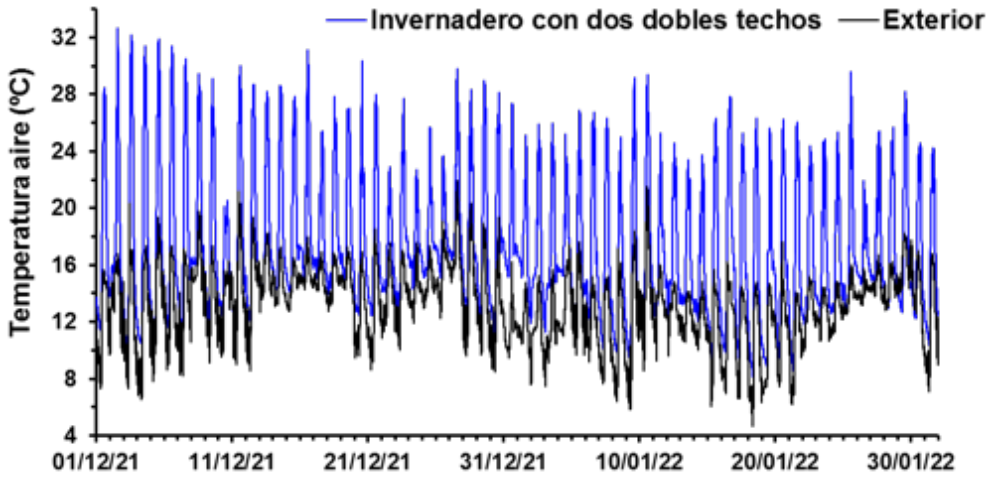


Figura 3. Dinámica de la temperatura del aire en un invernadero con doble techo fijo en pendiente, doble techo fijo horizontal sobre el emparrillado y cortinas plásticas en los pasillos con un cultivo de pimiento trasplantado en noviembre, con respecto al exterior.

4. Productividad de los cultivos

La información científica o técnica sobre cómo afecta el uso de tunelillos, cortinas y cubiertas flotantes al crecimiento y la productividad de los cultivos hortícolas en los invernaderos mediterráneos es escasa. Además, no hay información cuantitativa sobre cómo afectan estos sistemas pasivos a la incidencia de plagas y enfermedades en estos cultivos hortícolas, a pesar de que, en muchos casos, estos sistemas pasivos se instalan con el objetivo principal de reducir la entrada de plagas y agentes vectores de enfermedades, y/o evitar las condiciones climáticas que favorezcan la proliferación de las mismas. López-Marín y col. (2017), en estudios realizados en el campo de Cartagena con pimiento plantado en enero, encontraron que el uso de tunelillos de manta térmica tuvo un efecto significativo sobre la precocidad, al adelantar la recolección en 15 días, de forma que, a las tres semanas del inicio de la recolección, el aumento en la producción comercial del cultivo bajo tunelillos de manta térmica era de 1,8 kg m^{-2}. Aunque esta diferencia se redujo a 0,4 kg m^{-2} en la producción total del ciclo, la mayor precocidad conseguida permitió obtener una mayor rentabilidad económica del cultivo. Con respecto a la calidad del fruto, obtuvieron mayores pesos medios de frutos en las primeras recolecciones en el cultivo con tunelillos y no encontraron diferencias significativas en el resto de los parámetros de calidad evaluados (López-Marín y col., 2017).

5. Conclusiones y necesidades futuras

En general, el uso de los tunelillos, cubiertas flotantes y cortinas como sistemas pasivos de calefacción en ciclos de cultivos hortícolas que incluyan el periodo frío del año es una práctica extendida en los invernaderos mediterráneos para mejorar las condiciones climáticas y reducir la incidencia de plagas y enfermedades, pero apenas hay información cuantitativa al respecto, a pesar de que hay un amplio conocimiento práctico de agricultores y técnicos basado en su experiencia. En general, estos sistemas pasivos de calefacción de bajo coste pueden tener más interés, sobre todo, en los ciclos extra-tempranos y extra-tardíos.

Estos sistemas pasivos con frecuencia se instalan con el fin principal de reducir la entrada de plagas y agentes vectores de virosis o de mejorar las condiciones climáticas que favorezcan su proliferación, pero tampoco hay información cuantitativa sobre cómo afectan a la incidencia de plagas y enfermedades en los cultivos hortícolas en invernadero.

Para mejorar el uso de estos sistemas pasivos y adaptarlos a las necesidades de los cultivos hortícolas en invernadero mediterráneos, es necesario conocer cuantitativamente, mediante estudios teóricos o experimentales, cómo afectan al microclima del invernadero y a la productividad y calidad de los cultivos hortícolas, así como a la incidencia de plagas y enfermedades. Además, sería de gran interés conocer cómo combinar o integrar estos y otros sistemas pasivos de bajo coste, como los dobles techos y los acolchados, para mejorar las condiciones climáticas del invernadero y optimizar la rentabilidad de los cultivos hortícolas.

Bibliografía

López-Marín, J., Gálvez, A., Porras, I., Brotons-Martínez, J. M. (2017). Use of a PSNM to increase precocity and its benefits in greenhouse-grown sweet pepper. Journal of Agricultural Science and Technology 19 (4), 1005-1018.

López-Marín, J., García, J., Gálvez, A. (2018). Influencia del uso de la manta térmica en la producción precoz en cultivo de pimiento injertado bajo invernadero frío. XLIV Seminario de Técnicos y Especialistas en Horticultura, 57-68.

Sistemas pasivos de calefacción en invernaderos mediterráneos

Editado en Almería, abril 2022