

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA



TESIS DOCTORAL

**Estudio de la incidencia de enfermedades
fúngicas en invernaderos mediterráneos con
diferentes técnicas de control climático de bajo
coste**

AUTOR: Eugenio Ávalos Sánchez

DIRECTORES:

Prof. Dr. Alejandro López Martínez

Prof. Dr. Francisco Domingo Molina Aiz



Almería, julio 2023

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



Estudio de la incidencia de enfermedades
fúngicas en invernaderos mediterráneos con
diferentes técnicas de control climático de bajo
coste

AUTOR: Eugenio Ávalos Sánchez

DIRECTORES:

Prof. Dr. Alejandro López Martínez

Prof. Dr. Francisco Domingo Molina Aiz

Almería, julio 2023

Estudio de la incidencia de enfermedades fúngicas en
invernaderos mediterráneos con diferentes técnicas
de control climático de bajo coste

Study of the incidence of fungal diseases in
Mediterranean greenhouses with different low-cost
climate control techniques

AUTOR: Eugenio Ávalos Sánchez

DIRECTORES:

Prof. Dr. Alejandro López Martínez

Prof. Dr. Francisco Domingo Molina Aiz

Los objetivos que se plantean en este trabajo de Tesis Doctoral se podrán alcanzar gracias a la financiación obtenida con dos proyectos de investigación: el primero, el Proyecto de Investigación UAL2020-AGR-A1916 de la Convocatoria 2020 de ayudas en concurrencia competitiva a proyectos de I+D+i, de la Universidad de Almería, en el marco del Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020, cuyos investigadores principales son Diego L. Valera Martínez y Alejandro López Martínez, y el segundo, Proyecto de Investigación PID2019-111293RB-I00 titulado “Mejora de la rentabilidad en invernaderos incrementando la actividad fotosintética con técnicas pasivas de control climático (RINFOC)” de la Convocatoria 2019 Proyectos de I+D+i - RTI Tipo B del Ministerio de Ciencia e Innovación, cuyos investigadores principales son Diego L. Valera Martínez y Francisco D. Molina Aiz.

Agradecimientos

El primer, y principal agradecimiento, una vez terminada esta Tesis Doctoral, es para Álex, director de este trabajo. Desde aquel encuentro casual, que propició el origen de este documento, hasta ahora finalizado el trabajo, debo agradecerle el empeño y tesón que has puesto para que esto salga adelante. Gracias por facilitar el camino y hacerlo ameno, ayudando a superar las complicaciones que yo veía al principio. Vamos donde quieras.

Agradecer a Francisco Domingo Molina Aiz, también director de esta Tesis, la ayuda recibida en la redacción de algunos documentos y algunas conversaciones interesantes.

A María de los Ángeles Moreno Teruel, especialmente, por su ayuda en la redacción de los artículos científicos y su aporte de datos y trabajo a ellos, también a Patricia Marín Membrive y Juan Reca Cardeña.

A Francisco Palmero, Francisco Vela y Mireille Honoré, por su ayuda y control sobre los cultivos en los que se desarrollaron los ensayos aquí descritos.

A Andrés, Javi, Juan, Paco... en general a todos los trabajadores de la Fundación Ual-Anecoop, que cuidaron los cultivos e hicieron más amenas las largas horas de evaluación, con algún café, incluso en días fríos o lluviosos.

A Jose Antonio y Jehosuah, que en nuestros viajes de trabajo me permitían buscar bibliografías, o escuchaban mis disertaciones poco acertadas.

A mi padre, Eugenio con admiración, a mi madre Ana María, que siempre estará en mi pensamiento y mis hermanos Juan Francisco y Ana María, que siempre están para cualquier cosa.

A Sofía y Anita... Quizás por entretenerme demasiado...

Y a otras personas por diferentes momentos, Encarnación, María, Lola, Leovigildo y Rosario, Juan y Virginia, Paco Roque y Milagros, Virginia, Fran, Juanma, Francisco, Regina, Isabel, MariCarmen, Juan, Regina, Mari, Juan José, Virginia y Guzmán.

Índice

Presentación	1
Artículo JCR 1	2
Artículo JCR 2	2
Artículo JCR 3	3
Estudio derivado 1	4
Estudio derivado 2	4
Referencia de las Publicaciones	7
Artículo JCR 1	7
Artículo JCR 2	8
Artículo JCR 3	9
Estudios Derivados	10
Resumen.....	11
Abstract	13
1. Introducción	15
1.1. Antecedentes	15
1.1.1. Herramientas agronómicas modificadoras del clima en invernaderos.....	16
1.2. Enfermedades estudiadas.....	21
1.2.1. Pudrición de la corona y raíz	21
1.2.2. Oídio	22
1.2.3. Mildiús	23
1.2.4. Tizón temprano.....	23
1.2.5. Tizón del tallo gomoso.....	24
1.3. Justificación agronómica.....	24
1.4. Hipótesis	25
1.5. Objetivos.....	26
1.6. Metodología.....	26
1.6.1. Producción y calidad de la cosecha	27
1.6.2. EPPO.....	28
2. Efecto de diferentes sustratos, y riego con diferentes concentraciones salinas, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero tipo Almería.....	31
3. Influencia de la difusividad y transmitancia de un plástico de cubierta de invernadero sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en un cultivo de pepino	51
4. Efecto de las cubiertas plásticas en el desarrollo de enfermedades fúngicas en tomate (<i>Solanum lycopersicum L.</i>) y pimiento (<i>Capsicum annuum L.</i>) en invernaderos Mediterráneos	67
5. Influencia del uso de doble techo, combinado con el incremento de superficie de ventilación, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero multitúnel mediterráneo	83

6. Manejo de enfermedades fúngicas en invernaderos Mediterráneos usando dobles techos foto conversores en combinación con ventilación natural	95
7. Conclusiones	109
7.1. Publicación científica 1: Efecto de diferentes sustratos, y riego con diferentes concentraciones salinas, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero tipo Almería.	109
7.2. Publicación científica 2: Influencia de la difusividad y transmitancia de un plástico de cubierta de invernadero sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en un cultivo de pepino.....	110
7.3. Publicación científica 3: Efecto de las cubiertas plásticas en el desarrollo de enfermedades fúngicas en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) y pimiento (<i>Capsicum annuum</i> L.) en invernaderos Mediterráneos.....	111
7.4. Estudio derivado 1: Influencia del uso de doble techo, combinado con el incremento de superficie de ventilación, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero multitúnel mediterráneo.	112
7.5. Estudio derivado 2: Manejo de enfermedades fúngicas en invernaderos Mediterráneos usando dobles techos foto conversores en combinación con ventilación natural.....	113
7.6. Trabajos futuros	113
8. Bibliografía.....	115

Presentación

En el presente documento de Tesis Doctoral se exponen diferentes investigaciones, que relacionan el uso de técnicas de control climático pasivo en invernaderos, con el desarrollo de diferentes enfermedades fúngicas sobre los cultivos protegidos más importantes en la zona de estudio. Estas técnicas de control climático pasivo influyen sobre el ambiente en el que se desarrollan los cultivos, que a su vez afecta a la incidencia de las enfermedades fúngicas que atacan a estos cultivos.

La Tesis Doctoral se presenta mediante la modalidad de “*compendio de publicaciones*”. En esta modalidad se exige que se acrediten 3 publicaciones, de las cuales 2 deben estar en la categoría A de la escala de valoración de los resultados de investigación contenida en el Plan Propio de Investigación y Transferencia de la Universidad de Almería aprobado en el correspondiente año y que la tercera publicación esté incluida, al menos, en la categoría B de la escala de valoración previamente descrita.

Este Documento de Tesis Doctoral presenta tres artículos publicados en revistas incluidas en el Journal Citation Reports (JCR) de la Web of Science (WOS). Las tres publicaciones se encuentran dentro de la categoría de valoración A según la escala de valoración de la Universidad de Almería. Adicionalmente se presentan en esta Tesis Doctoral dos futuros artículos más, que son derivados de las investigaciones realizadas durante la realización de este trabajo, que serán enviados a revistas JCR en próximas fechas. Todas estas publicaciones han sido posteriores a la fecha de la primera matriculación en el Programa de Doctorado de Tecnología de Invernaderos e Ingeniería Industrial y Ambiental.

Artículo JCR 1

El primer artículo que se presenta en esta Tesis Doctoral es “Efecto del riego con diferentes concentraciones salinas en distintos sustratos en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero tipo Almería” (“Effect of Different Substrates, and Irrigation with Water with Different Saline Concentrations, on the Development of Tomato Fungal Diseases in an Almería-Type Greenhouse”), publicado en la revista *Agronomy*.

En este artículo se estudió el desarrollo de dos enfermedades sobre un cultivo de tomate desarrollado en un invernadero tipo “Raspa y Amagado”. El estudio determinó el nivel de desarrollo alcanzado por una enfermedad aérea (“oídio” powdery mildew) y otra de raíz (“podrición de la corona y raíz” crown and root rot in tomato), en función del tipo de salinidad aportada en la dotación de riego, así como su abonado y en función del sustrato en el que se desarrolló el cultivo de tomate. Tanto la estructura, como los sustratos y la dotación de riego influyeron de diferente manera en el cultivo de tomate estudiado, dando lugar a que el desarrollo de las enfermedades estudiadas fuera diferente en función de las técnicas de cultivo utilizadas.

Artículo JCR 2

El segundo artículo que se presenta en esta Tesis Doctoral es “Influencia de la difusividad y transmitancia de los plásticos usados como cubiertas de invernaderos en el desarrollo de enfermedades fúngicas en pepino” (“Influence of the Diffusivity and Transmittance of a Plastic Greenhouse Cover on the Development of Fungal Diseases in a Cucumber Crop”), publicado en la revista *Agronomy*.

Este artículo muestra cómo influyen las características ópticas de los materiales plásticos de cubierta en invernaderos, sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas que afectan al cultivo de pepino. Las diferentes características ópticas de los plásticos de cubierta de invernaderos permiten el paso a través de ellos de la radiación, pero provocando diferentes grados de luz difusa en el interior de los invernaderos, lo que provoca diferentes condiciones para el desarrollo de los cultivos en las zonas del invernadero, según los materiales de cubierta utilizados. Estas modificaciones de la radiación que llega a los cultivos, hacen que el desarrollo de los cultivos sea diferente y se vean afectados por diferentes

estreses, tanto bióticos como abióticos. Se estudiaron dos tipos de cubiertas plásticas dentro de un mismo invernadero, observando su efecto sobre tres enfermedades aéreas, en dos ciclos de cultivo de pepino. Las tres enfermedades estudiadas fueron: oídio (powdery mildew), mildiús (downy mildew) y tizón del tallo gomoso (gummy stem blight). Las tres enfermedades están muy relacionadas con las condiciones ambientales en las que se desarrolla el cultivo. En este trabajo se observaron diferencias estadísticamente significativas para el desarrollo de las enfermedades fúngicas en función del tipo de cubierta de invernadero que protegía a los cultivos.

Artículo JCR 3

El tercer artículo que se presenta en esta Tesis Doctoral es “Efecto de los plásticos de cubierta de invernaderos sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y pimiento (*Capsicum annuum* L.) en cultivos protegidos Mediterráneos” (“Effect of Greenhouse Film Cover on the Development of Fungal Diseases on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Pepper (*Capsicum annuum* L.) in a Mediterranean Protected Crop”), publicado en la revista *Agronomy*.

Esta publicación se realizó sobre dos ciclos diferentes de cultivos de solanáceas, un ciclo de tomate y otro de pimiento. En ambos ciclos se evaluaron la incidencia alcanzada por diferentes enfermedades fúngicas de la parte aérea de la planta sobre los cultivos. Se evaluó oídio (powdery mildew) y tizón temprano (early blight) en el ciclo de tomate, y oídio (powdery mildew) en el ciclo de pimiento. Los ensayos, realizados de manera similar al artículo previamente presentado, mostraron resultados similares a los obtenidos anteriormente. El cambio en las características de las estructuras, materiales de cubierta, afectó a las condiciones en las que se desarrollaron los cultivos de las diferentes zonas de estudio, dando lugar a diferencias en el rendimiento, cosecha y estreses bióticos y abióticos soportados por los cultivos protegidos. Se obtuvieron diferencias estadísticas en el nivel de daño alcanzado por las enfermedades, en función del plástico de cubierta bajo el que se desarrollaron, por lo que se demuestra que este tipo de herramientas, los plásticos que actúan sobre la calidad de la luz que pasa a través de ellos, podrían tener utilidad en el control de enfermedades fúngicas en los cultivos protegidos.

Estudio derivado 1

En esta tesis también se presenta un primer trabajo, aún no publicado, titulado “Influencia del uso de doble techo, combinado con el incremento de la superficie de ventilación, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero multitúnel mediterráneo” (“Influence of the use of double roof, combined with the increase of the ventilation surface, on the development of fungal diseases in a mediterranean/multi-span greenhouse”), que se intentará publicar en una revista JCR próximamente.

En este trabajo se combinaron principalmente dos técnicas de control climático pasivo, como son el uso de dobles techos con la combinación de una superficie de ventilación no convencional, la ventilación lateral tenía una apertura máxima de 3 m, para observar sus efectos sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas, en los principales cultivos hortícolas de Almería. Los cultivos elegidos para el trabajo fueron dos ciclos de otoño-invierno de pepino, un ciclo de tomate de primavera-verano y otro de pimiento también en primavera-verano. Se evaluaron diferentes enfermedades fúngicas sobre los cultivos obteniendo, que la combinación de estos dos sistemas de control climático pasivo consiguió una reducción muy elevada de enfermedades como mildiús (downy mildew), prácticamente haciéndola desaparecer, y una importante reducción también en el desarrollo de oídio (powdery mildew). Se estudiaron otras enfermedades fúngicas, que tuvieron un comportamiento diferente según las técnicas de control climático usadas en los distintos sectores del invernadero estudiado (Tizón temprano y tizón del tallo gomoso). La influencia de estas técnicas sobre el clima consiguió mejores cosechas, reduciendo los estreses tanto bióticos como abióticos a los que se enfrentan los cultivos protegidos.

Estudio derivado 2

Y, por último, se presenta un segundo trabajo, aún no publicado, titulado “Manejo de enfermedades fúngicas en invernaderos Mediterráneos usando dobles techos foto conversores en combinación con ventilación natural” (“Management of fungal diseases in Mediterranean greenhouses using photoconversion double roofs in combination with natural ventilation”), que se intentará publicar en una revista JCR próximamente.

En este trabajo se combinaron varias de las técnicas de control climático pasivo estudiadas anteriormente. Se estudiaron los efectos del riego, el uso de dobles techos la ventilación pasiva y los efectos foto conversores, en los plásticos usados como dobles techos. Obteniendo datos estadísticos según las zonas estudiadas, relacionados con el daño ocasionado por las enfermedades fúngicas sobre los cultivos. En este caso se estudiaron dos invernaderos con diferente ventilación y divididos en dos zonas de riego, que a su vez estaban cubiertas por dobles techos, en este estudio eran dobles techos con plásticos estándar y dobles techos con dos plásticos experimentales, con diferentes características de foto conversión de la luz que pasaba a través de ellos. Se volvieron a ensayar los mismos cultivos anteriormente descritos en los ensayos y artículos previos, dos ciclos de pepino, uno de tomate y otro de pimiento. En este trabajo todas las zonas estaban cubiertas por dobles techos, por lo que la incidencia de mildiús (downy mildew) fue muy baja. Las características foto convertoras de las láminas plásticas mostraron su efecto en el desarrollo del oídio (powdery mildew) principalmente, aunque también se observaron los efectos de la ventilación y el riego. Sobre las otras dos enfermedades estudiadas tizón temprano y tizón del tallo gomoso también se observaron efectos en función de las técnicas de control climático.

Referencia de las Publicaciones

Artículo JCR 1

Título: "Effect of Different Substrates, and Irrigation with Water with Different Saline Concentrations, on the Development of Tomato Fungal Diseases in an Almería-Type Greenhouse"

Autores: Eugenio Ávalos-Sánchez, Alejandro López-Martínez, Francisco D. Molina-Aiz, Juan Reca, Patricia Marín-Membrive, Diego L. Valera-Martínez

Nombre de la Revista: *Agronomy*

Volumen y páginas: 12 (5), 1050

Año: 2022

doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy12051050>

Datos JCR (Journal Citation Reports):

Factor de impacto 2021: 3.949

Categoría: Characteristics and Technology in Mediterranean Agriculture / Horticultural and Floricultural Crops

Ranking categoría: 18/90

Cuartil: Q1

Editor: MDPI

País de publicación: Suiza

ISSN 2073-4395

Artículo JCR 2

Título: “Influence of the Diffusivity and Transmittance of a Plastic Greenhouse Cover on the Development of Fungal Diseases in a Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Crop”

Autores: Eugenio Ávalos-Sánchez, María Ángeles Moreno-Teruel, Francisco Domingo Molina-Aiz, Alejandro López-Martínez, Araceli Peña-Fernández, Fátima Baptista, Diego Luis Valera-Martínez

Nombre de la Revista: *Agronomy*

Volumen y páginas: 12 (11), 2743

Año: 2022

doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112743>

Datos JCR (Journal Citation Reports):

Factor de impacto 2021: 3.949

Categoría: Characteristics and Technology in Mediterranean Agriculture / Horticultural and Floricultural Crops

Ranking categoría: 18/90

Cuartil: Q1

Editor: MDPI

País de publicación: Suiza

ISSN 2073-4395

Artículo JCR 3

Título: “Effect of Greenhouse Film Cover on the Development of Fungal Diseases on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Pepper (*Capsicum annuum* L.) in a Mediterranean Protected Crop”

Autores: Eugenio Ávalos-Sánchez, María Ángeles Moreno-Teruel, Alejandro López-Martínez, Francisco Domingo Molina-Aiz, Fátima Baptista, Patricia Marín-Membrive, Diego Luis Valera-Martínez

Nombre de la Revista: *Agronomy*

Volumen y páginas: 13 (2), 526

Año: 2023

doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020526>

Datos JCR (Journal Citation Reports):

Factor de impacto 2021: 3.949

Categoría: Characteristics and Technology in Mediterranean Agriculture / Horticultural and Floricultural Crops

Ranking categoría: 18/90

Cuartil: Q1

Editor: MDPI

País de publicación: Suiza

ISSN 2073-4395

Estudios Derivados

A raíz de los ensayos publicados, se realizaron otros ensayos con la misma metodología y los mismos ciclos de cultivo, utilizando otros sistemas de control climático pasivos objeto de estudio del equipo de investigación. Estos estudios se están redactando para futuras publicaciones en las revistas JCR Biosystems Engineering y Crop protection.

Estudio derivado 1

Influence of the use of double roof, combined with the increase of the ventilation surface, on the development of fungal diseases in a mediterranean/multi-span greenhouse

Estudio derivado 2

Management of fungal diseases in Mediterranean greenhouses using photo-conversion double roofs in combination with natural ventilation

Resumen

El control climático dentro de los cultivos protegidos es fundamental para el correcto desarrollo de las plantas y obtención de cosechas con rendimientos viables y sostenibles para los productores. En los invernaderos de Almería se usan técnicas de control climático pasivas, de manera generalizada, que requieren de muy pocos o ningún aporte de energía extra. Estas técnicas de control climático hacen que las producciones en los invernaderos solares de Almería sean muy sostenibles, y tengan menor huella de carbono, que las producciones en sistemas protegidos que necesiten un mayor aporte de energía extra.

En esta Tesis Doctoral se relaciona el uso de sistemas de control climático pasivo, con el desarrollo de las enfermedades fúngicas sobre los cultivos protegidos. Así, aportando información sobre cómo se desarrollan estas enfermedades en función de los sistemas de control climático utilizados, se podría conseguir un manejo de los estreses bióticos que no solo dependiese del uso de fitosanitarios, cuyo uso excesivo conlleva problemas de sostenibilidad, medioambientales y de salud, reduciendo el uso de estos productos y evitando la aparición de resistencias a los modos de acción de los fitosanitarios por parte de los organismos fitopatógenos. Además, en el momento actual de reducción de materias activas, permitidas como fitosanitarios, por parte de las normativas de la Unión Europea, no solo se puede depender de una herramienta para el control de las enfermedades de los cultivos, sino que se deben usar un conjunto de soluciones múltiples que nos ayuden a manejar de la manera más sostenible estas enfermedades. El conocimiento sobre cómo afectan diferentes técnicas agronómicas sobre el estrés biótico de los cultivos se muestra muy necesario en las estrategias de manejo de cultivos futuros.

En este trabajo se evaluaron como influían diferentes técnicas agronómicas sobre la capacidad de desarrollo de las enfermedades fúngicas en el interior de los invernaderos, y como las diferentes técnicas de control climático afectaban a diferentes enfermedades fúngicas endémicas de la zona. Se evaluaron técnicas de reducción de riego, en combinación con diferentes salinidades del agua de riego y diferentes sustratos, en un primer trabajo. En los siguientes trabajos se evaluó el uso de ventilación pasiva de los invernaderos en combinación con el uso de cubiertas plásticas, que influían en la radiación que llegaba a los cultivos,

obteniendo diferencias en los desarrollos de las enfermedades fúngicas estudiadas, según la herramienta agronómica utilizada. A partir de estos trabajos surgieron otros derivados de ellos, con resultados interesantes, al utilizar la combinación de usos de riego deficitario con ventilación natural y el uso de dobles techos plásticos con tecnología de foto conversión. Esta tecnología de foto conversión, permite que los plásticos usados en los invernaderos transformen la longitud de onda de la luz que llega a los cultivos, aportándoles diferentes beneficios.

El estudio de las enfermedades se realizó en 5 invernaderos, un invernadero “raspa y amagado” tipo Almería, para los estudios de la influencia de los riegos y los sustratos, y cuatro invernaderos multitúnel para los efectos de los plásticos que modificaban las características de la luz que llegaba a los cultivos. En todos los invernaderos se tuvo en cuenta como la ventilación y las dotaciones de riego afectaban a los hongos fitopatógenos. Se estudiaron cinco enfermedades, una de suelo, pudrición de la corona y raíz (fusarium), y cuatro aéreas, oídio (powdery mildew), mildiús (downy mildew), tizón temprano (early blight) y tizón del tallo gomoso (gummy stem blight). Durante los diferentes ensayos realizados, se observó el efecto de los sistemas pasivos de control climático, sobre el desarrollo de estas enfermedades y como algunos de estas técnicas agronómicas mejoraban la sanidad de los cultivos, reduciendo la incidencia de las enfermedades estudiadas.

Palabras clave: control climático, sistemas de bajo coste, enfermedades fúngicas, invernadero, protección de cultivos.

Abstract

Climatic control in protected crops is essential for the correct crops development and obtaining viable and sustainable yields for farmers. In the greenhouses of Almería, passive climatic control techniques are mostly used, which require little or no extra energy input. These climatic control techniques make the productions in the solar greenhouses of Almería very sustainable, and have a lower carbon footprint, than the productions in protected systems that require a greater contribution of extra energy inputs.

In this Doctoral Thesis, the use of passive climatic control systems is related to the development of fungal diseases on protected crops. Thus, by providing information of diseases development based on the climatic control systems used, biotic stress management could be achieved that not only depends on the use of phytosanitary products, the excessive use of these products which leads to sustainability, environmental and health problems. Reducing the use of phytosanitary products could avoiding the appearance of resistance to these products by phytopathogenic organisms. In addition, at the current time of reduction of active substances, allowed as phytosanitary products, by the regulations of the European Union, the diseases management cannot depend on a single tool for the control of crop diseases, so the farmers must also use a set of multiple solutions that help to manage these diseases in the most sustainable way. Knowledge about how different agronomic techniques affect the biotic stress of crops is very necessary in future crop management strategies.

In this work, the influence of different agronomic techniques on the pathogenic fungi development conditions, inside the greenhouses, and how the different climate control techniques affected different endemic fungal diseases in the area were evaluated. Irrigation reduction techniques were evaluated, in combination with different salinities of irrigation water supplies and different substrates, in a first work. In the following works, the use of passive ventilation in greenhouses was evaluated in combination with the use of plastic covers, which influenced the radiation that reached the crops, obtaining differences in the development of the fungal diseases studied, according to the agronomic tool used. From these works, others derived from them arose, with interesting results, by using the combination of deficit irrigation with

natural ventilation and the use of double plastic roofs with photo-conversion technology. This photo-conversion technology allows the plastics used in greenhouses to transform the wavelength of light that reaches the crops, providing different benefits to the crops.

The study of the diseases was carried out in 5 greenhouses, a “raspa y amagado” Almería-type greenhouse for studies of the influence of irrigation and substrates, and four multi-tunnel greenhouses for the effects of plastics that modified the characteristics of the light that reached the greenhouse crops. In all the greenhouses, it was considered how the ventilation and irrigation endowments affected the pathogenic fungi development. Five diseases were studied, one soil borne crown and root rot, and four aerial, powdery mildew, downy mildew, early blight, and gummy stem blight. During the different tests carried out, the effect of passive climate control systems was observed on the development of these diseases and how some of these agronomic techniques improved the crops health, reducing the incidence of the diseases studied.

Keywords: climate control, low cost systems, fungal diseases, greenhouse, crop protection.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los cultivos hortícolas protegidos son una solución, debido a su alta productividad, a la demanda cada vez más alta de alimentos de calidad, debido al crecimiento de la población global (FAO, 2016). Agronómicamente, los cultivos protegidos se basan en el control de las características climáticas que envuelven a los cultivos, intentando que las condiciones climáticas sean lo más favorables para el desarrollo de las plantas y su producción. Así los cultivos protegidos en invernadero, que aíslan a los cultivos de las condiciones climáticas externas, obtienen mejores rendimientos que los cultivos desarrollados al aire libre (Medina *et al.*, 2009; Kuswardhani *et al.*, 2013).

Los cultivos desarrollados en invernadero se ven beneficiados por el microclima que se crea dentro de estas estructuras (Nicolosi *et al.*, 2017), que afecta a los ciclos productivos. Los invernaderos permiten el manejo del clima dentro de ellos, controlando la temperatura del aire, la humedad relativa, la concentración de CO₂, la irradiación que llega a los cultivos o el riego de estos (Van Straten *et al.*, 2010). El manejo climático en los invernaderos muchas veces requiere del aporte de energía para conseguir las condiciones climáticas óptimas para los cultivos (Gupta y Chandra, 2002; Heidari y Omid 2011), lo que hace que este tipo de cultivos sean menos sostenibles y eficientes debido al alto coste que tiene la energía.

La provincia de Almería es la región del Mediterráneo con la mayor concentración de invernaderos de Europa (Castillo-Díaz *et al.*, 2021), en esta región, gracias a las condiciones climáticas de la zona, se dan las condiciones óptimas para el desarrollo de cultivos hortícolas extra-tempranos, debido a sus inviernos suaves (Hernández *et al.*, 2017). Estos invernaderos son energéticamente muy sostenibles debido a que sus tecnologías pasivas, que necesitan poco aporte de energía, permiten aprovechar con una alta eficiencia los recursos y condiciones climáticas de la zona (Baudoin, *et al.*, 2017). En este tipo de agricultura se usan principalmente sistemas de control climático pasivos, basados en técnicas como la ventilación natural y el blanqueo de las cubiertas plásticas de los invernaderos (López-Martínez *et al.*, 2019). Este uso de sistemas pasivos está muy extendido en esta zona por el ahorro que supone con respecto a otros sistemas de control climático activos, como podrían ser la calefacción, la ventilación forzada o sistemas de

humidificación que requieren aporte de energía para su funcionamiento, sistemas que por otra parte son difíciles de rentabilizar debido al alto coste tanto de estas tecnologías como de la energía requerida para su funcionamiento (Valera *et al.*, 2016). El uso de estos sistemas pasivos, aportan otra importante ventaja a estos cultivos, que actualmente se valora mucho a nivel Europeo, como son la sostenibilidad y una producción con una menor huella de carbono, en los que estos invernaderos de la costa mediterránea aventajan a otros que necesitan importantes aportes de energía para conseguir condiciones climáticas favorables para los cultivos (Pérez-Neira *et al.*, 2018; Ouazzani Chahidi *et al.*, 2021).

1.1.1. Herramientas agronómicas modificadoras del clima en invernaderos

En este trabajo se estudiaron diferentes herramientas, que usan los agricultores en la producción hortícola bajo invernadero, que tienen la capacidad de cambiar el microclima que rodea a los cultivos en función de cómo se usen. A su vez, se relacionó el uso de estas herramientas con el efecto que producían sobre enfermedades fúngicas que se desarrollaron sobre los cultivos. Estas técnicas de modificación del clima requieren pocos aportes de energía para su funcionamiento.

Riego y sustratos

El primero de los artículos presentados en esta tesis estudia el efecto de las dotaciones de riego y salinidad en diferentes enfermedades de un cultivo de tomate, además de estudiar los sustratos donde se desarrolla el cultivo. Las diferentes dotaciones de riego influyen en la evapotranspiración de los cultivos (Gonçalves *et al.*, 2019), que a su vez influyen en parámetros climáticos como la humedad relativa en el interior de los invernaderos (Granados *et al.*, 2017), el aumento de la evapotranspiración regula el clima en el interior de los invernaderos. En este primer artículo también se estudiaron los sustratos sobre los que se cultivan las plantas, que también influyen en la evapotranspiración del cultivo. Ya que la evapotranspiración se constituye de la combinación de la evaporación desde el suelo, sustrato o superficies de las plantas, y la transpiración que generan los cultivos por su actividad metabólica. Por lo que la evapotranspiración integra interacciones entre la atmósfera, la planta y el suelo (Costa *et al.*, 2019). Los sustratos de los cultivos sin suelo suelen estar cubiertos por plásticos, por lo que su aporte de evaporación

desde el sustrato se considera nulo, influyendo climáticamente de manera diferente a como lo haría un cultivo en suelo.

Las características y dotaciones de riego influyen sobre la susceptibilidad que pueden presentar los cultivos a los ataques de enfermedades fúngicas, ya sean aéreas y de suelo (Stewart-Wade, 2011; Del Castillo *et al.*, 2019). Así las concentraciones de sales en las dotaciones de riego pueden hacer que se absorban más unos elementos de fertirrigación que otros, lo que puede afectar al desarrollo de enfermedades sobre los cultivos (Fondevilla *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2020; Yermiyahu *et al.*, 2020).

Los sustratos usados para el desarrollo del cultivo también pueden afectar a las condiciones climáticas, como hemos comentado anteriormente, pero además las características microbiológicas de los sustratos (Wang *et al.*, 2020) o su capacidad de retención, en mayor o menor grado, de las sales aportadas en el riego (Satti *et al.*, 1992; Cuartero *et al.*, 1999) afectan al desarrollo de enfermedades de suelo (Flowers *et al.*, 1977). Este conocimiento, sobre cómo afectan estas herramientas agronómicas a las diferentes enfermedades fúngicas, que se desarrollan en invernadero, puede ser una herramienta útil para mitigarlas en cierto grado.

Cubiertas plásticas con alta difusividad

Las cubiertas de los invernaderos son fundamentales para el buen funcionamiento de estos, ya que son las que filtran la luz solar y dejan pasar parte de esta modificándola, afectando al desarrollo y rendimiento de los cultivos (Moreno Teruel, 2021; Moreno Teruel *et al.*, 2021). Por lo que las propiedades térmicas de estas cubiertas tienen un efecto muy importante sobre las características climáticas en el interior de los invernaderos, siendo la cubierta ideal aquella que deje pasar la totalidad de la radiación fotosintéticamente activa (Papadakis *et al.*, 2000). El tipo de material de estas cubiertas influye de manera determinante en el uso o ahorro de energía en los invernaderos, así como en la calidad de los microclimas que se crean dentro de los invernaderos (Von Elsner *et al.*, 2000). Las cubiertas plásticas y sus características ópticas son posiblemente uno de los sistemas de regulación climática pasiva más importantes que presentan los invernaderos, ya que el mayor grado de temperatura de un invernadero se debe al efecto que provoca la radiación de onda corta, que pasa a través del material de cubierta, mientras que la longitud de onda más larga de la re radiación infrarroja, que proviene de

los objetos calentados, no sale al exterior del invernadero, lo que provoca el calentamiento del aire en el interior del invernadero que no puede salir fácilmente de este impidiendo que la energía se pierda por convección (Mistriotis, *et al.*, 1997; Tantau y Akyazi, 2017).

La mayoría de las cubiertas de invernadero en el área mediterránea y en la región de Almería son cubiertas plásticas (Valera *et al.*, 2016). En los últimos años se han desarrollado materiales plásticos que influyen sobre la luz que llega a los cultivos, debido a los beneficios que aportan a la calidad y rendimiento de las cosechas (Ilic *et al.*, 2017; Murakami *et al.*, 2017). Una mayor difusión de la luz hace que llegue más luz a todas las áreas de cultivo incrementando el área foliar fotosintéticamente activa (Brodersen *et al.*, 2008). La luz difusa se distribuye mejor en el cultivo (Gu *et al.*, 2002) y evita zonas de sombra que se crean con la radiación directa. Las zonas de sombra en los cultivos favorecen el desarrollo de enfermedades como oídio (Suthaparan *et al.*, 2016), por lo que este tipo de materiales plásticos podría ayudar al control de enfermedades fúngicas, dentro de un manejo integrado de enfermedades desarrolladas en invernadero.

Ventilación natural

El principal propósito de la ventilación en los invernaderos es eliminar el exceso de temperatura y humedad dentro de estos, así como introducir, mediante el intercambio de aire, el CO₂ que las plantas necesitan para realizar correctamente su actividad fotosintética y metabólica, manteniendo unas condiciones climáticas dentro de los invernaderos lo más favorables posibles para el desarrollo de los cultivos (Linden *et al.*, 1990; von Zabeltitz, 1994). Un ambiente saludable y sostenible dentro de los invernaderos es fundamental para el desarrollo de los cultivos y para conseguir un confortable ambiente para los trabajadores en el invernadero (Zhang *et al.*, 2022).

El estudio de la ventilación natural, solo basada en la apertura de ventanas y el movimiento natural del aire cerca de los invernaderos, comienza a ser de mayor interés para los investigadores a partir de la década de 1990 (Zhang *et al.*, 2022). La importancia de la ventilación en los invernaderos ha hecho que surjan numerosos estudios y modelos sobre como esta se comporta dentro de los invernaderos (Molina-Aiz *et al.*, 2004; Boulard *et al.*, 2006; Molina-Aiz *et al.*, 2009; López-Martínez *et al.*, 2019). Las diferentes tecnologías que mejoran el uso de la ventilación

natural dentro de los invernaderos mejoran las condiciones climáticas, la eficiencia de la energía usada en control climático, mejoran la calidad del aire y el confort térmico en los invernaderos (Akrami *et al.*, 2020; Sakiyama *et al.*, 2020).

La influencia en el clima de la ventilación afecta de manera importante al desarrollo de muchas enfermedades fúngicas sobre el cultivo (Itagaki, *et al.*, 2018). En la mayoría de las ocasiones una reducción de la humedad en el interior de los invernaderos, mediante ventilación natural, es favorable para la reducción del nivel de enfermedades fúngicas sobre los cultivos (Shetty *et al.*, 2002; Mohamed *et al.*, 2016), pero no siempre, ni para todas las enfermedades fúngicas (Lage, *et al.*, 2019), por lo que el manejo adecuado de la ventilación es una herramienta eficaz para el manejo integrado de enfermedades dentro de los invernaderos.

Dobles techos

El uso de dobles techos, dentro de los invernaderos, es otra técnica agronómica que permite modificar el clima sin aportes de energía (Cemek *et al.*, 2006), manteniendo la temperatura y evitando la pérdida de esta, en condiciones climáticas frías. Los dobles techos en invernadero incrementan la temperatura y la humedad de las zonas que protegen (López-Martínez *et al.*, 2021), por lo que en invernaderos con aporte de energía, por ejemplo para calefacción, reducen el gasto ahorrando en energía para mantener la temperatura (Ahamed *et al.*, 2019).

Los dobles techos provocan un mayor aislamiento en los invernaderos de las condiciones exteriores (Papadakis *et al.*, 2000), que junto con los incrementos de humedad y temperatura, pueden provocar situaciones de estrés tanto abiótico como biótico para las plantas, favoreciendo el desarrollo de enfermedades fúngicas (Cañadas *et al.*, 2017). Por ello, el uso de la ventilación natural es fundamental para conseguir un ambiente óptimo para el desarrollo de los cultivos. La combinación de las técnicas del uso de doble techo y ventilación natural mejora e incrementa el rendimiento de los cultivos de invernadero. Así el uso de dobles techos mejora la calidad de los cultivos de tomate (Abak *et al.*, 1994) e incrementa la cantidad de licopeno presente en los cultivos de tomate (Jarquín-Enríquez *et al.*, 2013).

El incremento de humedad y temperatura que provoca el uso de dobles techos crea las condiciones climáticas idóneas para el desarrollo de enfermedades fúngicas debido a la condensación y el posible goteo de

agua libre sobre el cultivo (Chantoiseau *et al.*, 2016). Por ello, la inclinación de estos dobles techos, que ya se usa en el campo de Almería (Valera *et al.*, 2016), es fundamental para evitar estos goteos, junto con la ventilación natural, evitando así la proliferación de algunas enfermedades fúngicas (Baptista *et al.*, 2012).

Plásticos foto conversores

Al igual que las cubiertas de alta difusividad, los plásticos foto conversores, de una manera similar influyen en las condiciones climáticas que se observan en los invernaderos cubiertos con estos plásticos. Existen en desarrollo muchos materiales de cubierta para los invernaderos que modifican las propiedades de la luz que pasa a través de ellos (Hemming *et al.*, 2006). Los plásticos foto conversores tienen la capacidad de transformar las longitudes de onda de la luz que llegan a los cultivos, transformando el espectro de luz que incide sobre la cubierta, en longitudes de onda que influyen más en el proceso fotosintético de los cultivos (Yoon *et al.*, 2020). La manipulación de la longitud de onda que llega a los cultivos presenta muchas ventajas para los cultivos protegidos en los invernaderos, desde una mejor y mayor calidad de la producción, hasta ahorros energéticos y mejoras en las condiciones climáticas en el interior de los invernaderos (Lamnatou y Chemisana, 2013). La capacidad de estos materiales de alterar las ratios de luz roja/roja-lejana, azul/rojo y azul/rojo lejano se puede conseguir incorporando pigmentos a los plásticos de cubierta. Estas cubiertas modifican las respuestas de las plantas a la luz, actuando como reguladores de crecimiento (Moore *et al.*, 2006). Así, se puede lograr un incremento de la producción transformando la luz ultravioleta, que llega a las plantas, en longitud de onda roja (600-611 nm) (Edser, 2002). Las longitudes de onda más importantes para las plantas son las longitudes que comprende el espectro azul (455-505 nm), en los momentos iniciales del desarrollo y la floración y las longitudes del espectro rojo (620-760 nm) para el crecimiento y desarrollo general de la planta (Kondratyev, 1969). Un desequilibrio en las longitudes de onda que llegan a los cultivos también podría provocar en ellos efectos perjudiciales o no deseados (Edser, 2002).

Al igual que en los plásticos de alta difusividad, el cambio de la longitud de onda que llega a las plantas también afectaría a los estreses bióticos que estas deberían afrontar. Hay múltiples estudios sobre la sensibilidad

de enfermedades fitopatógenas, como el oídio, a la calidad de la luz que llega a ellas (Elad *et al.*, 2007; Suthaparan, *et al.*, 2017; Suthaparan, *et al.*, 2018; Pathak, *et al.* 2020; Ota, *et al.*, 2021).

1.2. Enfermedades estudiadas

Durante este trabajo se estudiaron 5 enfermedades que son endémicas de la zona, y que aparecieron de manera natural sobre los cultivos. Estas enfermedades provocaron pérdidas en la producción y calidad de la cosecha, y en algunos casos el final prematuro de los cultivos.

1.2.1. Pudrición de la corona y raíz

La pudrición de la corona y raíz es una enfermedad de suelo que en nuestro estudio atacó a uno de los cultivos de tomate. El patógeno responsable de esta enfermedad en este caso fue *Fusarium oxysporum f. sp. radicis-lycopersici*. Es un hongo saprófito que se desarrolla en la rizosfera de varias especies, es polífago, ataca a un gran número de hospedadores (Lievens *et al.*, 2008), aunque los aislados suelen especializarse en hospedadores específicos (Kim *et al.*, 2001). Esta enfermedad es una de las más destructivas en tomate, causando importantes pérdidas en la cosecha, tanto en invernadero como al aire libre, y en cultivos sin suelo (Katan *et al.*, 1991; Horinouchi *et al.*, 2008; McGovern *et al.*, 2015). El micelio de este hongo puede sobrevivir de manera saprófita en los restos de cosecha, y sus clamidosporas, le permiten sobrevivir hasta que las condiciones le sean propicias para su desarrollo durante periodos largos de tiempo (McGovern *et al.*, 2015).

Fusarium oxysporum f. sp. radicis-lycopersici puede atacar al hospedador en cualquier momento de su desarrollo, generando graves daños en las plantas. En estadios tempranos provoca la caída de los cotiledones, provocando una necrosis en la base del tallo que puede provocar la muerte de la plántula, en estadios posteriores, ya con la planta en periodos de recolección, también provoca la necrosis en la base del tallo, llegando a marchitar la planta, pero también es responsable de amarilleos y afligimiento en las hojas, y retrasos del crecimiento de la planta (Can *et al.*, 2010). Esta enfermedad puede ser responsable de pérdidas entorno al 40% de la producción en campo abierto (Davis y Paulus, 2014), aunque donde es más problemática es en cultivos protegidos, especialmente en sistemas que usan suelos inertes o sustratos de producción, con pérdidas que pueden alcanzar el 60% (McGovern *et al.*, 2015).

1.2.2. Oídio

Oídio (powdery mildew) es una de las enfermedades que más afectan a diferentes cultivos alrededor de todo el mundo (Jarvis *et al.*, 2002), de hecho, en este trabajo oídio fue la única enfermedad que apareció en todos los ciclos de cultivos. Dentro de la denominación de oídio se encuentran diferentes patógenos que atacan a múltiples hospedadores. En este trabajo se identificaron dos principales patógenos, *Sphaerotheca fuliginea* en el caso del pepino y *Leveillula taurica* para el pimiento y el tomate.

El patógeno *S. fuliginea* provoca la aparición del micelio sobre las hojas de las cucurbitáceas, sus principales hospedadores, visualmente parece como un polvo blanco sobre la superficie de la hoja, de ahí su nombre común “ceniza”, también puede aparecer sobre los tallos (Pérez-García *et al.*, 2009). Normalmente no se observa micelio del hongo sobre los frutos, pero su actividad sobre las hojas provoca pérdidas en la cosecha y en la calidad de esta, los ataques severos pueden provocar la defoliación de la planta (Lebeda *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2021).

El patógeno *L. taurica*, afectó en este trabajo a los cultivos de solanáceas. El ataque de oídio en pimiento o tomate, comienza cuando el conidio del hongo llega a la superficie de la hoja, germina y las hifas penetran en el hospedador por los estomas u otra apertura, y desarrollan su micelio en el interior del mesófilo de la hoja (Zheng *et al.*, 2013). Los primeros síntomas sobre las hojas son manchas de color amarillo, que dan lugar, tras el desarrollo de los conidióforos, a la aparición del característico polvo blanco que describe a la enfermedad (Molot *et al.*, 1990; Morales-Manzo *et al.*, 2021). En este caso también se ven afectadas las producciones de manera similar y también los ataques agresivos provocan defoliación (Parisi *et al.*, 2020).

La oidiopsis es un serio problema para los cultivos en invernadero durante los periodos de otoño, invierno y primavera (Parisi *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2021), debido a que la alta humedad y una buena ventilación favorecen su desarrollo y dispersión (Saxena y Saxena, 2002; Nam *et al.*, 2005). Oídio es el responsable de uno de los mayores usos de pesticidas a nivel europeo debido a los daños que causa sobre los cultivos (Zheng *et al.*, 2013; Parisi *et al.*, 2020), que pueden llegar a pérdidas de 4 kg/m² en pimiento (Cerkauskas *et al.*, 2003).

1.2.3. Mildiús

Mildiús (downy mildew) solo afectó en nuestro estudio a los cultivos de pepino, aunque también puede afectar a los de tomate, siendo patógenos diferentes, los que atacan a las cucurbitáceas y solanáceas, al igual que en el caso del oídio. Mildiús causado por el patógeno *Pseudoperonospora cubensis*, es una de las enfermedades más graves que afectan a las cucurbitáceas, tanto en cultivos protegidos como al aire libre, debido a su gran agresividad (Neufeld y Ojiambo, 2012; Granke *et al.*, 2014). Mildiús es la enfermedad que más pérdidas económicas genera en los cultivos de cucurbitáceas a nivel mundial (Thomas *et al.*, 2017).

El mildiús se ve favorecido, por humedades altas y temperaturas entre 15 y 20 °C, condiciones ideales para la germinación de sus esporas (Savory *et al.*, 2011). Estas condiciones climáticas son habituales en los invernaderos. La infección comienza cuando los esporangios sueltan las zoosporas, que se ven favorecidas para su dispersión por la presencia de agua libre sobre el cultivo, las zoosporas generan hifas que penetran en el tejido de la hoja a través de los estomas, formando hifas intercelulares con haustorios (Savory *et al.*, 2011). Los daños que provoca en la hoja son lesiones cloróticas delimitadas por los nervios de las hojas, con aspecto poligonal, estas lesiones cloróticas dan lugar a necrosis que pueden dañar la totalidad de la hoja (Savory *et al.*, 2011). Además de por el viento y el agua libre en los cultivos, algunos autores han descrito la transmisión de mildiús a través de las semillas (Cohen *et al.*, 2014).

1.2.4. Tizón temprano

Alternaria solani es el patógeno que provoca el tizón temprano sobre los cultivos de solanáceas. Es una enfermedad importante y frecuente en los cultivos de tomate alrededor del mundo (Foolad *et al.*, 2000). La enfermedad se desarrolla con altas temperaturas y humedades, atacando a las hojas, tallos, pétalos y frutos. El hongo prefiere atacar tejidos maduros y su ataque se da, principalmente, durante la formación de los frutos, por lo que provoca graves daños en las cosechas (Chaerani y Voorrips, 2006). Es una enfermedad que, en condiciones climáticas favorables para ella, es muy agresiva y puede generar pérdidas en los cultivos que pueden superar el 70% (Desta y Yesuf, 2015; Bessadat *et al.*, 2016).

Los síntomas del tizón temprano se pueden encontrar en cualquier órgano de la planta, aunque normalmente los síntomas iniciales

comienzan en la hoja. Los daños se caracterizan por la aparición de manchas necróticas, que tienen marcados anillos concéntricos dentro de ellas, alrededor de la necrosis se extiende un borde de color amarillo (Meena *et al.*, 2016).

1.2.5. Tizón del tallo gomoso

El tizón del tallo gomoso es una enfermedad distribuida a nivel mundial en invernadero, causada por el patógeno *Didymella bryoniae* (Zitter, 1992). Este patógeno puede infectar cualquier parte de la planta, menos las raíces, y puede atacar a los cultivos en cualquier estadio, siempre que se den las condiciones climáticas adecuadas (Sabaratnam, 2018). *D. bryoniae* causa una pudrición interna en los frutos, que a veces no se detecta en la cosecha, lo que provoca más pérdidas durante el almacenamiento y transporte (Gusmini, *et al.*, 2017), esta pudrición interna en ocasiones provoca frutos con estrechamientos en el extremo floral.

Los síntomas del tizón del tallo gomoso suelen desarrollarse a partir de heridas, observándose lesiones acuosas de color marrón pálido, en la base del tallo principal, incluso pueden formarse grietas en el tallo, a partir de las cuales surge savia con textura gomosa (Ferguson, 2009). Los síntomas en hoja aparecen en los bordes de estas inicialmente, creando una necrosis de color marrón pálido. Esta lesión se extiende en forma de “v” en las hojas totalmente desarrolladas (Ferguson, 2009).

El tizón del tallo gomoso necesita humedades altas en las zonas de crecimiento de las plantas, y agua libre sobre las hojas, para desarrollarse correctamente en su hospedador (Islam *et al.*, 2020). La infección puede ser causada por conidios liberados por picnidios o por ascosporas, que aprovechan las heridas de poda, o la senescencia de las flores, para crear chancros en el tallo o ablandamientos, estrechamientos o amarilleos en las zonas donde se produce la abscisión floral en los frutos (Arny y Rowe, 1991).

1.3. Justificación agronómica

Los sistemas de control climático pasivos influyen en el manejo del clima de los invernaderos, consiguiendo resultados más sostenibles, que otros sistemas de manejo climático que necesitan aportes de energía. El microclima, en el interior de los invernaderos, influye de manera determinante en el desarrollo de enfermedades fúngicas sobre los

cultivos, en ocasiones siendo muy favorable para la proliferación de estas enfermedades (Baptista, 2007; Hernández *et al.*, 2017). A nivel europeo, se considera una característica de calidad deseable encontrar el menor número de restos de productos fitosanitarios sobre los cultivos. Por lo que actualmente nos encontramos, a nivel europeo, en un marco regulatorio en el que van disminuyendo, progresivamente, las materias activas que los agricultores pueden usar en su lucha contra las enfermedades. Sustituyendo productos fitosanitarios, de síntesis química, por elementos biológicos que ayudan en el control de plagas, como biofungicidas. Estos biofungicidas presentan eficacias sensiblemente menores que los fitosanitarios de síntesis química. Por lo que, para un manejo de enfermedades fúngicas adecuado, se necesitaran un conjunto de soluciones agronómicas, que nos permitan obtener altos grados de eficacia, sumando varias herramientas con eficacias menores contra las enfermedades. En este contexto, el conocimiento de cómo afectan diferentes técnicas agronómicas de control climático sobre las enfermedades fúngicas, se muestra fundamental, como herramienta complementaria a otras para un manejo correcto de la sanidad vegetal en los invernaderos. Estas herramientas también contribuirían a la sostenibilidad de las explotaciones agrícolas, ya que permitirían un menor uso de fitosanitarios, del tipo que sean, evitando posibles problemas ambientales y de salud, y ayudando a paliar el problema de la aparición de resistencias a las materias activas, de cualquier tipo, por parte de los organismos fitopatógenos.

1.4. Hipótesis

Una de las principales razones para el control climático en los invernaderos es evitar la incidencia de enfermedades fúngicas (Körner y Challa, 2003). Aunque los agricultores utilizan fungicidas, el desarrollo de resistencias, o la imposibilidad de su uso por restricciones medioambientales (Köhl *et al.*, 2000), hace necesario el uso de alternativas para el manejo de las enfermedades fúngicas que atacan a los cultivos. La provincia de Almería es la región mediterránea con mayor concentración de invernaderos de Europa (Castillo-Díaz *et al.*, 2021). Este tipo de agricultura se desarrolla en invernaderos de bajo costo, con sistemas pasivos para el control del clima (Castilla y Montero, 2008) basados básicamente en ventilación natural y blanqueamiento, debido a que el uso de calefacción, ventilación forzada, humidificación y otros sistemas activos son difíciles de rentabilizar (Valera *et al.*, 2016). La hipótesis, en la que se basa este trabajo, es que se puede minimizar los

efectos negativos que producen las enfermedades fúngicas sobre los cultivos de invernadero con una adecuada gestión de los sistemas de control climático pasivos.

1.5. Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es el estudio, análisis y mejora de diferentes sistemas de control climáticos pasivos, que permiten mejorar las condiciones climáticas en el interior de los invernaderos mediterráneos, con diferente tipo de estructura (tipo Almería y multitúnel), sin suponer un alto coste, relacionándolos con el efecto que podrían tener, estos sistemas de bajo coste, sobre las enfermedades fúngicas que atacan a los principales cultivos hortícolas protegidos. Así como la influencia en el clima y las enfermedades fúngicas, del uso de diferentes tipos de aguas de riego y dotaciones de riego.

Objetivos específicos:

- Estudiar los efectos del uso de cubiertas plásticas, con diferentes propiedades ópticas, sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en diferentes cultivos hortícolas.
- Estudiar los efectos del uso de dobles techos, combinados con ventilación natural, sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en diferentes cultivos hortícolas.
- Estudiar los efectos del uso de diferentes plásticos foto conversores, usados como doble techo, sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas sobre los principales cultivos hortícolas producidos en invernaderos mediterráneos.
- Determinar si el uso de diferentes tipos de agua y dotaciones de riego, puede afectar al desarrollo de enfermedades en cultivos hortícolas bajo invernadero.

1.6. Metodología

Para la realización de esta Tesis Doctoral se trabajó en invernaderos tipo Almería (“raspa y amagado”) e invernaderos multitúnel ubicados en el Campo de Prácticas de la Universidad de Almería “Catedrático Eduardo Fernández” del Centro de Innovación y Tecnología “Fundación UAL-ANECOOP”. Para el desarrollo de los ensayos se utilizaron las siguientes estructuras en diferentes ciclos de cultivo:

- 1 invernadero multitúnel con una zona de estudio de superficie de ventilación superior al 30%, combinado con el uso de doble techo y plásticos foto conversores, muy por encima de la superficie de ventilación que suelen presentar los invernaderos comerciales de la provincia de Almería, y otra zona con ventilación convencional y sin uso de doble techo. Diferenciando dos dotaciones de riego en cada área de estudio.
- 2 invernaderos multitúnel equipados con dobles techos de plásticos foto conversores y estándar, con ventanas convencionales, diferenciándose en la superficie de ventilación. Diferenciando dos dotaciones de riego en cada área de estudio.
- 1 invernadero multitúnel con ventanas convencionales, dividido en dos zonas cubiertas por diferentes plásticos de cubierta, con propiedades ópticas diferentes.
- 1 invernadero tipo Almería (raspa y amagado) con ventanas convencionales, con diferentes sustratos, calidad de agua de riego y dosificación de riego.

Durante la fase cultivo se realizó:

- Seguimiento del crecimiento del cultivo (morfología).
- Cuantificación de la producción y medida de parámetros de calidad.
- Seguimiento sobre las posibles fitopatologías que aparezcan sobre el cultivo (siguiendo la normativa internacional eppo, centrándose principalmente en enfermedades fúngicas).

En cada uno de los invernaderos multitúnel se analizaron cuatro ciclos de cultivos diferentes: Dos ciclos de otoño-invierno de pepino, un ciclo de tomate de primavera-verano y un ciclo de pimiento de primavera-verano. En el caso del invernadero “raspa y amagado” se llevó a cabo el seguimiento de un ciclo de tomate entre septiembre 2020 y abril 2021.

1.6.1. Producción y calidad de la cosecha

Se seleccionaron cuatro líneas de cultivo en cada sector (consideradas repeticiones estadísticas). Los datos de producción (rendimiento comercializable y no comercializable) se registraron por separado para cada unidad experimental. Una balanza electrónica EKS Premium (EKS España, S.A., Barcelona, España), con una sensibilidad de 10 g y una capacidad máxima de 40 kg, se utilizó para este fin.

El tomate fue cosechado en rama, y la cosecha fue realizada cuando la rama de tomate estaba completamente madura. En el caso del cultivo de pepino, 10 pepinos (cada día de cosecha), de cada uno de los sectores experimentales fueron seleccionados al azar, se procedió de manera similar en el ciclo de pimiento. El peso de los frutos de pepino y pimiento se midió con una balanza PB3002-L Delta Range® (Mettler Toledo, SA, España; midiendo rango de 0 a 3200 g y sensibilidad de 0,01 g). El diámetro ecuatorial del fruto se midió con un calibre digital (Medid Precisión, SA, Barcelona, España; midiendo rango de 0-150 mm y resolución de 0,01 mm), la longitud de la fruta se midió con una cinta. Para conocer el contenido de sólidos solubles se colocaron varias gotas de jugo de pepino en un refractómetro PAL1 (Atago Co., LTD., Saitama, Japón; rango de medición de 0 a 53,0 °Brix y una precisión de $\pm 0,2$ °Brix). Un penetrómetro digital (PCE-FM 200, PCE-Ibérica S.L., Albacete, España), con un rango de 0 a 200 N, una resolución de 0,1 N y una precisión de 0,5%, se usó para evaluar la firmeza de los frutos.

1.6.2. EPPO

La *European and Mediterranean Plant Protection Organization* (EPPO) es una organización intergubernamental responsable de la cooperación en sanidad vegetal dentro de la región euro mediterránea. Fundada en 1951 por 15 países europeos, EPPO ahora tiene 52 miembros. Sus objetivos son proteger las plantas, desarrollando estrategias internacionales contra la introducción y propagación de plagas que son una amenaza para la agricultura, la silvicultura y el medio ambiente, y promoviendo métodos de control de plagas seguros y eficaces. Siguiendo los términos de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), la EPPO es una Organización Regional de Protección Fitosanitaria y, por lo tanto, participa en los debates mundiales sobre sanidad vegetal. EPPO es una organización de establecimiento de normas, que ha producido una gran cantidad de Normas en las áreas de productos fitosanitarios y cuarentena vegetal. Estas Normas constituyen recomendaciones dirigidas a las Organizaciones Nacionales de Protección Fitosanitaria de los países miembros de la EPPO. Finalmente, EPPO promueve el intercambio de información entre sus países miembros manteniendo servicios de información y bases de datos sobre plagas de plantas, y organizando numerosas conferencias y talleres (*European and Mediterranean Plant Protection Organization*).

La organización EPPO tiene una serie de guías para evaluar la eficacia en la protección de cultivos que ejercen diferentes herramientas agronómicas. Durante el desarrollo de los diferentes estudios presentados en esta tesis se siguieron las siguientes normativas: EPPO Standard PP 1/181 (Realización y presentación de informes de ensayos y evaluación de eficacia), EPPO Standard PP 1/152 (Diseño y análisis de ensayos de evaluación y eficacia) and EPPO PP 1/57 (Powdery mildews en cucurbitáceas y otros vegetales), EPPO 1/65 (Downy mildew de lechuga y otros vegetales), EPPO 1/263 (*Alternaria solani* y *Alternaria alternata* en patata y tomate), EPPO 1/135 (Evaluación de fitotoxicidad), EPPO 1/121 (Manchas de hojas en vegetales, ALTESO) son aplicables, junto con EPPO 2/29 (Cultivos de solanáceas bajo cultivo protegido) y EPPO 1/163 (Regulación del crecimiento en vegetales).

Las evaluaciones se realizaron con un mínimo de cuatro repeticiones, excepcionalmente en el caso de la primera publicación se evaluaron tres repeticiones, ya que se aceptan tres repeticiones en caso de invernadero. Cada repetición estuvo compuesta por un mínimo de 6 plantas, (las normativas EPPO seguidas para los cultivos analizados exigen un mínimo de 5), por parcela evaluada. El número de plantas evaluadas varió en función del cultivo y del tipo de siembra, evaluando siempre el mismo número de plantas dentro de los diferentes trabajos expuestos en esta Tesis. De cada parcela se evaluaron los daños provocados por las enfermedades analizadas en hoja, evaluando aleatoriamente 50 hojas por repetición. En el caso de *Fusarium oxysporum f. sp. radicle-lycopersici* se analizaron los daños sobre 50 plantas en cada repetición, ya que para este tipo de enfermedad las normativas EPPO permiten un análisis de planta total, plantas infectadas o muertas, por cómo se desarrolla la enfermedad. Todas las evaluaciones se realizaron semanalmente, desde el inicio de los primeros síntomas de las diferentes enfermedades, hasta el final del cultivo.

2. Efecto de diferentes substratos, y riego con diferentes concentraciones salinas, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero tipo Almería

Resumen

El propósito de esta investigación fue evaluar el efecto de la concentración salina del agua de riego, y el sistema en el que se siembra un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), en su sanidad vegetal. El estudio se llevó a cabo en la provincia de Almería, en un invernadero típico de la zona. Dos sistemas de cultivo fueron ensayados: (i) el suelo artificial "enarenado" y (ii) un sustrato de fibra de coco. Cada uno de estos sistemas de cultivo fueron regados con tres soluciones de riego con diferentes concentraciones salinas: (i) T1 con una conductividad eléctrica de 0,6 dS/m, (ii) T2 con 1,5 dS/m, y (iii) T3 con 3,0 dS/m. Usando la normativa de la *European and Mediterranean Plant Protection Organization* (EPPO), se identificaron dos enfermedades: (i) oídio (*Leveillula taurica*), que presentó una menor incidencia en las plantas sembradas en suelo y regadas con los tratamientos con menor concentración total en la solución nutritiva, y (ii) pudrición de la corona y raíz en tomate (*Fusarium* *f. sp. radicis-lycopersici*) con menor incidencia en plantas de tomate cultivadas en suelo y mayor incidencia en plantas de tomate cultivadas en sustrato de coco. Se observó un mayor rendimiento en las plantas de tomate trasplantadas en enarenado que en sustrato de fibra coco, aunque se encontró un mayor nivel de grados Brix en los cultivos con mayores niveles de enfermedad y mayor estrés por salinidad.

Palabras clave: cultivo protegido, conductividad eléctrica EC, solución nutritiva, pudrición de la corona y de la raíz, oídio

Article

Effect of Different Substrates, and Irrigation with Water with Different Saline Concentrations, on the Development of Tomato Fungal Diseases in an Almería-Type Greenhouse

Eugenio Ávalos-Sánchez, Alejandro López-Martínez ^{*}, Francisco D. Molina-Aiz [†], Juan Reca [†], Patricia Marín-Membrive and Diego L. Valera-Martínez [†]

Research Centre CIAIMBITAL, University of Almería, Ctra. de Sacramento s/n, 04120 Almería, Spain; oinegeu@gmail.com (E.Á.-S.); fmolina@ual.es (F.D.M.-A.); jreca@ual.es (J.R.); patriciamarin@ual.es (P.M.-M.); dvalera@ual.es (D.L.V.-M.)

* Correspondence: alexlopez@ual.es

Abstract: The aim of this research was to assess the effect of both the salinity level and the type of growing system on the vegetative health of a tomato crop (*Solanum lycopersicum*). The study was carried out in Almería (Spain) in a local typical greenhouse. Two different growing media were tested: (i) the artificial soil “enarenado” and (ii) a coconut fiber substrate. Each of these growing media was irrigated with water with three different saline concentrations: (i) T1 with an electrical conductivity of 0.6 dS/m, (ii) T2 with 1.5 dS/m, and (iii) T3 with 3.0 dS/m. Using the European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) regulations, two diseases were identified: (i) powdery mildew (*Leveillula taurica*) with a lower disease incidence in tomato plants grown in soil and in plants irrigated with decreasing salinity treatments and (ii) crown and root rot in tomato (*Fusarium* f. sp. *radicis-lycopersici*) with a lower incidence in tomato plants grown in soil and a higher incidence in tomato plants grown in coconut substrate. A higher yield was observed in tomato plants transplanted in *enarenado* than in coconut substrate, although a higher level of Brix degrees was observed in the crops with higher disease severity and salinity stress.

Keywords: protected crop; EC electric conductivity; nutrient solution; crown and root rot; powdery mildew



Citation: Ávalos-Sánchez, E.; López-Martínez, A.; Molina-Aiz, F.D.; Reca, J.; Marín-Membrive, P.; Valera-Martínez, D.L. Effect of Different Substrates, and Irrigation with Water with Different Saline Concentrations, on the Development of Tomato Fungal Diseases in an Almería-Type Greenhouse. *Agronomy* **2022**, *12*, 1050. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051050>

Academic Editor: Jorge F.S. Ferreira

Received: 8 April 2022

Accepted: 26 April 2022

Published: 27 April 2022

Publisher’s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The province of Almería is the Mediterranean region with the highest concentration of greenhouses in Europe. This type of agriculture is developed using low-cost solar greenhouses, with passive climate control systems [1], based on natural ventilation and bleaching of the plastic covers to control the amount of radiation in the interior of the greenhouses. Sophisticated systems such as the use of heating, forced ventilation, humidification and other active systems are difficult to amortize in low-cost solar greenhouses [2].

One of the largest greenhouse horticultural production areas in the world can be found on the coast of Almería, and the water supply varies significantly depending on the type of crop that is produced, as crops are watered by drip irrigation systems [3]. The water resources mostly come from underground catchments through wells or boreholes, in which some contamination of the underlying aquifers has been detected [4].

Irrigation with good-quality water increases plant production [5]. The use of localized irrigation is widely extended to greenhouses in Almería, representing 99.9% of the surface of greenhouse crops [2,6]. Localized irrigation systems are usually associated with fertirrigation, which is the application of fertilizer through irrigation water [7].

Fertirrigation regularly maintains a low nutrient input to the soil as an irrigation solution and allows for automation in fertilizer application, with a high initial investment cost [8].

It is known that the irrigation of crops with highly saline water produces an imbalance in the nutrients taken up by the plant, causing low concentrations of macronutrients in its tissues, which negatively affects growth [9], as well as fruit size and yield [10,11].

Crops irrigated with highly saline water are, for the most part, sensitive to this parameter (Na^+ contents), leading to expected reductions in the production and yields of crops with moderate levels of salinity in the root solution [12]. In the case of tomato crops, in Southeastern Spain in particular, it is necessary to know the response to salinity of these crops in soilless areas in order to optimize yield and production quality [13].

Sodium ions (Na^+) that accumulate in excess in plant tissues can cause a decrease in fruit production in various crops, and a smaller fruit size has also been observed in crops with higher Na^+ content in their tissues [14].

In tomato cultivation, improvements in fruit quality have been documented in cultivars irrigated with water with a higher salt concentration [15,16]. Water with a higher salt concentration improves the quality of tomato fruit due to the increase in sugars and soluble solids in the fruit. Some authors found that a higher solid concentration could be the result of a decrease in water transferred to the fruit, which did not affect dry matter transport, leading to higher sugar concentrations in the fruit [15,17], although other studies showed an increase in dry matter and glucose in fruits irrigated with more highly saline water [9]. A greater transport of assimilates from tomato leaves to fruit and an increase in their transformation to starch was also found [18]. Tomatoes irrigated with saline water exhibit an increased rate of dry matter transport, thereby decreasing the water transport rate [19]. On the other hand, excess fertilization in the irrigation nutrient solution usually makes plants more susceptible to disease attacks [20].

About 500 species of downy mildew pathogens have been found to be pathogenic to crop plants and can affect more than 1500 plant species [21]. Powdery mildews are one of the most important diseases affecting agricultural production [22].

Leveillula taurica is a hemiendophytic pathogen that causes clear visual symptoms on crop leaves. In severe attacks, a large number of leaf lesions cause a weakening of the plants. It is a common disease of greenhouse tomato crops worldwide [23]. The disease causes severe yield losses in both outdoor and greenhouse crops. Symptoms of *L. taurica* include the growth of white mycelium on leaves, leading to the development of chlorotic lesions that eventually lead to necrosis in those areas [24].

Fusarium oxysporum f. sp. *radicis-lycopersici* (FORL) is a saprophytic fungus that develops in the rhizosphere of various plant species. It is a pathogen with a large number and diversity of hosts, although it displays a preference for specialization on specific hosts. Isolates of the fungus that are considered pathogens of the same species are assigned the form “specialist” [25].

This saprophyte can reach a growing area or soil via contaminated seeds, infected soil or compost containing the fungus [26]. The effects of *F. oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (FORL) on the plants it infects include the wilting of the plant, which may result in plant death or the weakening of the crop, leading to a loss in yield and fruit quality [27,28]. Visual symptoms are observed at the stem level above ground, with necrotic lesions appearing on the root collar and stem base.

The objective of this study is to highlight the effects of different crop systems irrigated using water with different saline concentrations and different nutrient solutions, applied through fertigation, on the development of fungal diseases in a tomato crop. In addition, we investigate the consequences of the different stresses generated by the salt concentration of irrigation water and fungal diseases, which are derived from this use of irrigation, on a tomato crop under Mediterranean greenhouse conditions.

2. Efecto de diferentes sustratos, y riego con diferentes concentraciones salinas, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero tipo Almería

2. Materials and Methods

2.1. Experimental Greenhouses and Cropping System

The trials were carried out in an Almería-type greenhouse “*Raspa y Amagado*” (Figure 1) located in the UAL-ANECOOP Experimental Station “*Catedrático Eduardo Fernandez*” of the University of Almería (36°51' N, 2°17' W and 87 m.a.s.l.).

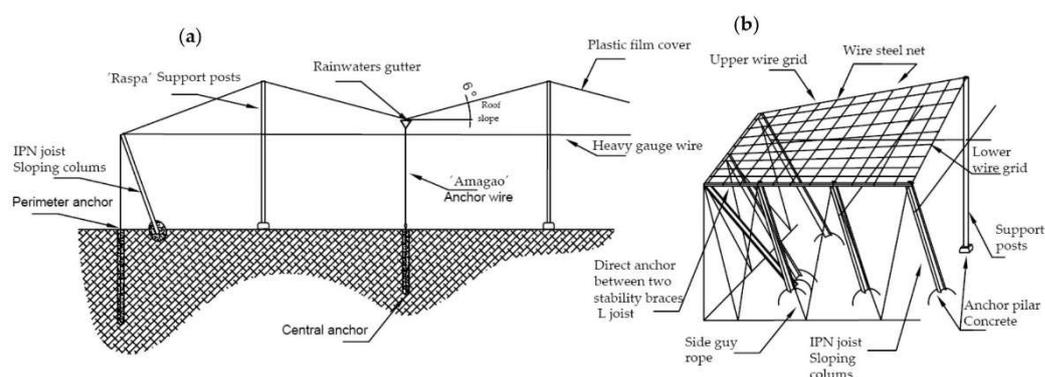


Figure 1. “*Raspa y Amagado*” greenhouse: (a) section; (b) corner greenhouse details.

The “*Raspa y amagado*”-type greenhouse is a typical Almería greenhouse consisting of gabled modules with interior modules that have symmetry with respect to the ridge [2]. This structure is composed of two basic elements (Figure 1): (i) The vertical structure consists of rigid supports that can be differentiated according to their location along the perimeter or indoors. (ii) The flexible cover structure is composed of two overlapping galvanized grids (upper and lower) that support and hold the sheet of plastic between them [2].

In the trial, we applied three different treatments with different electric conductivity levels to the nutrient solution. Treatment T1 was a low-salinity treatment consisting of irrigation water with an electrical conductivity (EC) of 0.6 dS m⁻¹ (desalinated seawater). The final EC of the nutrient solution was 2.2 dS m⁻¹ after the addition of the fertilizers. The irrigation water of treatment T2 had an initial EC of 1.5 dS m⁻¹, which increased to 2.5 dS m⁻¹ after the fertigation. The electrical conductivity of treatment T3 was 3.0 and 3.5 dS m⁻¹ for the raw water and the nutrient solution, respectively, as shown in Table 1. Each of these three treatments was applied by fertirrigation, both in the “*enarenado*” system and in the coconut fiber system.

Table 1. Electric conductivity in different irrigation areas in the experiment. T, treatment; S, typical soil substrate “*enarenado*”; H, coconut fiber substrate.

Greenhouse Irrigation	Soil	EC dS/m		
		EC Water	ΔEC Fertilization	EC in Nutrient Solution
T1-S	“ <i>Enarenado</i> ”	0.6	1.6	2.2
T2-S		1.5	1	2.5
T3-S		3	0.5	3.5
T1-H	coconut fiber substrate	0.6	1.6	2.2
T2-H		1.5	1	2.5
T3-H		3	0.5	3.5

Table 2 shows the ion composition of the different types of irrigation water.

Table 2. Water ion composition of the three types of irrigation water. EC, electric conductivity for treatment (dS m^{-1}); ions and anions of interest for irrigation (mmol l^{-1}).

Salinity Levels	EC	Ions and Anions									
		NO_3^-	SO_4^{2-}	H_2PO_4^-	HCO_3^-	Cl^-	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	NH_4^+
1	0.6	0.00	0.06	0.01	0.75	4.48	0.12	0.37	0.13	4.39	0.00
2	1.5	0.00	1.47	0.01	3.55	7.28	0.12	3.17	1.54	5.91	0.00
3	3.0	0.00	3.58	0.01	7.75	11.48	0.12	7.37	3.65	8.18	0.00

The fertilizer supply method was adapted from Sonneveld and Straver’s ideal solution [29]. Fertilizer was supplied by simulating the situation in the field so that, in the case of desalinated water, the final EC with fertilizers would be $2.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. In the case of water with intermediate salinity, this increased to $2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, and in the case of water with higher salinity, it increased to $3.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Table 3 shows the ion characteristics of the fertilization irrigation solution.

Table 3. Theoretical final irrigation nutrient solution composition for each treatment. EC, electric conductivity for treatment (dS m^{-1}); ions and anions of interest for irrigation (mmol l^{-1}).

Salinity Levels	EC	Ions and Anions									
		NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
1	2.2	12.00	1.51	1.31	0.75	4.48	0.50	7.12	3.92	1.08	4.39
2	2.5	9.50	1.51	1.47	3.55	7.28	0.00	7.62	4.17	1.54	5.91
3	3.5	4.50	2.01	3.58	7.75	11.48	0.00	4.62	7.37	3.65	8.18

The leaching fraction of the coconut fiber treatments was 20% since this is a common management practice in the area; the leaching fraction was not recirculated.

These EC treatments were applied to both growing media: the “enarenado” sandy soil (S) (Figure 2) and the coconut fiber substrate (H) (Figure 3c). The “enarenado” is a common layered artificial soil typically used in greenhouses in Almería [2].

First, the original soil was covered with an initial half meter layer of soil with a high clay content. This layer prevents major losses of irrigation water caused by deep percolation; this is the main area where the roots develop. The second layer of manure or organic matter was placed over the clayey soil. Finally, the plot was covered with a fine layer of sand (average particle diameter < 3 mm) [2].

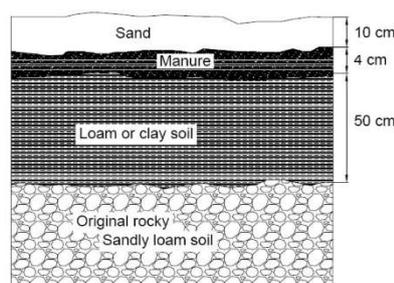


Figure 2. “Enarenado” experiment details.

The different treatments were fertirrigated independently. Fertirrigation was applied to each treatment depending on the nutrient concentration of the irrigation water, so the same final ideal solution, adapted from Sonneveld and Straver [29], was applied to each treatment. To accomplish this goal, the irrigation system was composed of an automated fertirrigation head and one independent irrigation network for each treatment.

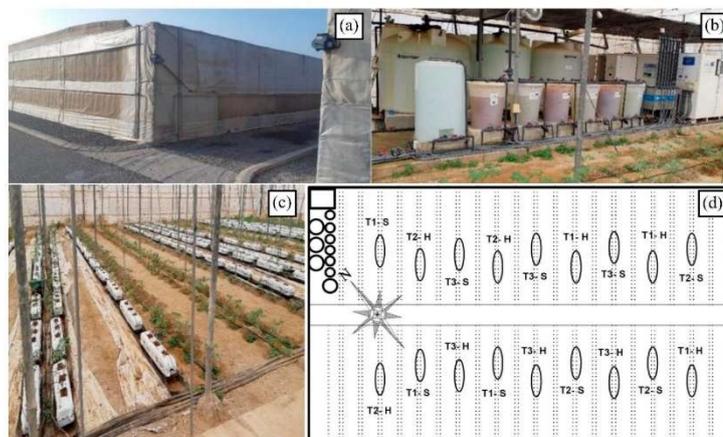


Figure 3. Experimental “Raspa y Amagado” greenhouse: (a) irrigation installation; (b) plants in typical soil substrate and in coconut fiber substrate (c) orrigation treatments and powdery mildew plot assessment distribution; (d) treatments T1, T2 and T3; S, typical soil substrate “enarenado”; H, coconut fiber substrate.

2.2. Plant Material

The study was carried out in an autumn–winter tomato (*Solanum lycopersicum*) cropping cycle, with the commercial variety “Ramyle RZ F1” (Rijk Zwaan Ibérica, S.A., Almería, Spain), a long-life tomato of indeterminate size, which is harvested as a bouquet. Seeding was carried out in coconut fiber substrate and a typical soil substrate (“enarenado”) from the area with localized drip irrigation at a density of 2 plant/m². The planting design was a double row of plants seeded 0.5 m apart, with a distance between rows of 2 m.

The seeds were germinated in a nursery in optimal conditions for their development. All the seeds used in the trial were germinated under the same conditions and irrigated with the same nutritive solution. The crop was transplanted on 7 September 2020 to the experimental greenhouse (until 14 March 2021) and after this date was irrigated with the different waters and the nutrient solutions shown in Table 1. The plants were transplanted with the third true leaf on the main stem, unfolded (BBCH 13).

2.3. Plant Disease Development Quantification

During the development of the experiment, the diseases identified in this study appeared naturally; in this trial, we did not inoculate the pathogen. From the beginning of the appearance of both diseases, differences were observed in their development on the plants. These differences in disease development speed varied depending on the substrate used, and differences were even observed in the development of both diseases between the plants irrigated with the different types of nutritional solutions studied, so a disease assessment was performed. The first symptom of the disease was noticed in December 2020. The identification of the fungi, which cause the disease, was carried out through the direct observation and observation of mycelia, spores and conidia under a microscope [30].

For the design of the trial and the evaluation of disease incidence, EPPO standards were applied. For powdery mildew and Fusarium crown and root rot diseases, EPPO Standard PP 1/181 (Conduct and reporting of Efficacy Evaluation Trials), EPPO Standard PP 1/152 (Design and Analysis of Efficacy Evaluation Trials) and EPPO PP 1/57 (Powdery Mildews in Cucurbits and Other Vegetables) are applicable, along with EPPO PP 2/29 (Solanaceae Crops under Protected Cultivation), EPPO 1/163 and EPPO 1/121.

The percentage of affected leaf area on the upper and lower surfaces of at least four leaves on each plant was evaluated. For each experimental sector of the greenhouse, assess-

ments plots were established in the different irrigation zones (Table 1). In each assessment plot, 12 plants were evaluated. For each plant analyzed, a minimum of 4 uniformly distributed leaves were evaluated (a total of 50 leaves were evaluated by each assessment plot). In total, for each treatment (T1-H, T1-S, T2-H, T2-S, T3-S and T3-H), 150 leaves were analyzed for every different irrigation zone.

Figure 4 shows an example of the quantification of the infection percentage index on a cucurbit leaf according to the EPPO regulations. The evaluation of the level of disease (powdery mildew) was carried out every 7 days from the beginning of the disease until the end of the crop cycle. A final evaluation was performed 7 days before the end of the crop cycle.

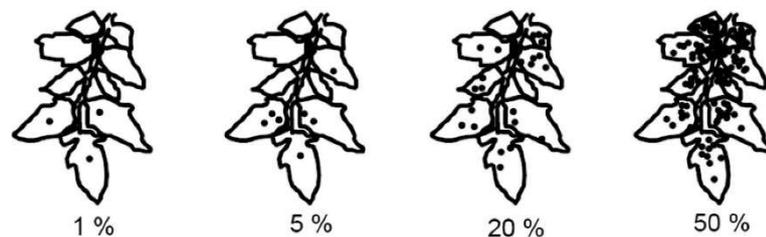


Figure 4. Example assessment of % leaf area infected.

For the *Fusarium* analysis, a count was conducted of plants affected by the disease that showed symptoms in the vascular bundles, which, over time, wilted the tomato plants (Figure 5). In each irrigation zone and different substrate, 50 plants (total of 150 plants for every combination of substrate and irrigation) were analyzed. An evaluation of the level of disease (*Fusarium* crown and root rot) was carried out every 7 days from the beginning of the disease until the end of the crop cycle. A final evaluation was performed 7 days before the end of the crop cycle.



Figure 5. *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* damage (a) and root detail (b).

2.4. Fruit Production and Quality Measurements

Production data (marketable and non-marketable yield) were registered separately for each experimental unit. An EKS Premium electronic scale (EKS Spain, S.A., Barcelona, Spain), with a sensitivity of 10 g and a maximum capacity of 40 kg, was used for this purpose.

Fruit weight was measured using a PB3002-L DeltaRange scale, with a resolution of 0.1 g and a span of 0.5 to 3100 g. A digital caliper was used to monitor the fruit diameter. A refractometer (PAL-1, Atago Co., LTD., Saitama, Japan), with a range of 0.0 to 53.0% Brix°, a resolution of 0.1% Brix° and accuracy of $\pm 0.2\%$ Brix°, and a digital penetrometer (PCE-FM 200, PCE-Ibérica S.L., Albacete, Spain), with a range of 0 to 200 N, a resolution of 0.1 N and an accuracy of $\pm 0.5\%$, were used to measure the Brix degrees and firmness of the fruit, respectively. The tomato was harvested on the branch, and the harvest was carried out when the tomato branch was fully ripe, on the following dates: 13 January 2021, 8 February 2021, 18 February 2021 and 9 March 2021.

2.5. Statistical Analysis

The experimental greenhouse was divided into 18 experimental units. For the trial design, we used a randomized block design, with three replications for every irrigation type and every crop system (two crop system and three salinity levels). The different treatments were distributed randomly, resulting in the layout depicted in Figure 3d. The plots of six square meters (3 m plot length and 2 m plot width) of every single replication were formed for 12 tomato plants. The assessment of the disease was carried out over 50 subsamples for each plot. These subsamples consisted of 50 leaves distributed randomly in the 12 plants that formed the plots. We, therefore, analyzed 150 subsamples for every crop system and irrigation solution for powdery mildew assessment. For *Fusarium* crown and root rot, the design had three replications, and the assessment was performed using 50 random plants in each replication, with 150 plants evaluated for each treatment.

The statistical analysis of the data was performed with the software Statgraphics Centurion v.19 (Manugistics Inc., Rockville, MD, USA) using an analysis of variance (considered significant if the *p*-value is ≤ 0.05), comparing the mean values with the procedure of minimum significant difference of Fisher (LSD). Bartlett, Cochran and Hartley tests were used to determine whether a sector had a similar variation. For parameters with different variance, we performed a nonparametric analysis with the Friedman test, with each row representing a block (the evaluation date), using averages graphs.

Multiple sample comparison was used to compare the data. The F-test in the ANOVA table tests whether there are any significant differences amongst the means. The method used to discriminate among the means was Fisher's least significant difference (LSD) procedure.

3. Results

3.1. *Fusarium* Crown and Root Rot

Fusarium crown and root rot symptoms were first observed on 24 December before the first harvest. The disease quantification was monitored every 7 days, until 14 March 2021. At this kinetic point, some plots of the trial reached infection rates higher than 60%.

As shown in Figure 6 and Table S1, the areas irrigated in coconut substrate showed a high prevalence of crown and root rot compared to the areas irrigated in soil, and these differences were statistically significant.

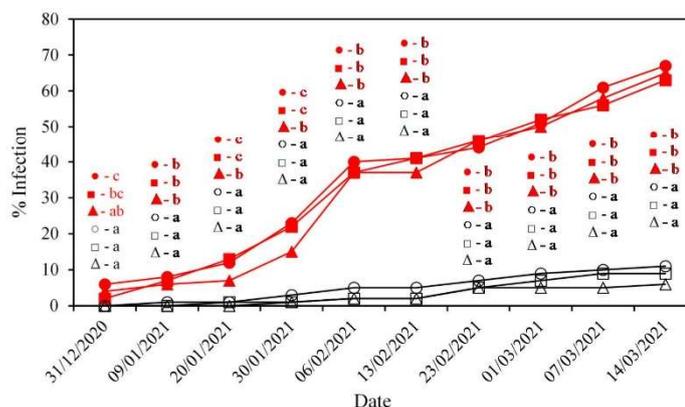


Figure 6. Development of *Fusarium* crown and root rot percentage of infection over time in the sectors with different irrigation and substrates. Treatments: T1-H (■), T1-S (□), T2-H (▲), T2-S (△), T3-H (●) and T3-S (○). S, typical soil substrate “enarenado”; H, coconut fiber substrate. Different letters in the same column indicate statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (*p*-value ≤ 0.05).

The infection and development of the *Fusarium* crown and root rot were faster in the areas irrigated in coconut substrate than in “*enarenado*” soil areas, as shown in Figure 6. In our case, the coconut substrate had a lower volume than the “*enarenado*” soil, so the roots of the plants were nearer than in the “*enarenado*” soil, which could increase the infection by root-to-root contact in coconut substrate.

Figure 6 shows the mean values of the percentage of infection in the plots affected by *Fusarium* crown and root rot, as well as the statistically differentiated groups obtained in this trial.

Figure 6 shows no clear differences from the severity of *Fusarium* crown and root rot correlated with the salt concentrations in the different irrigation applications. Statistically, no difference was observed for the *enarenado* system, possibly due to the very low level of development of the disease. In the case of the coconut fiber system, from the beginning of the evaluations, statistical differences were observed depending on the salinity with which the crop was irrigated, but upon reaching a certain level of disease, when the percentage of infection was over 30%, no statistically significant differences were observed. We could observe in some evaluation periods that the plots irrigated with treatment 2 (T2-H) presented statistically lower rates of *Fusarium* crown and root rot infection; this may be due to the fact that this treatment did not present extreme values of salinity concentrations, due to both the addition of fertilizers and the excess of salt, mainly Na^+ , in the irrigation water.

Figure 7 shows the difference in vigor between plants in coconut fiber substrate and those in “*enarenado*” soil, mainly due to the attack of *F. oxysporum* f. sp. *radices-lycopersici*, which was more pronounced in coconut fiber, while that of plants sown in “*enarenado*” soil was almost inappreciable.



Figure 7. Difference in vigor between plants in coconut fiber substrate (left) and those in “*enarenado*” soil (right) for treatment T2 at 23 February 2021.

3.2. Powdery Mildew

As for the *Fusarium* analysis, the areas with coconut substrate showed a high level of powdery mildew (Table S2). For powdery mildew, we observed statistical differences between different substrates and different irrigation treatments. A decrease in the percentage of infection was observed on 6 February 2021; this is due to a leaf pruning carried out on the lower leaves of the tomato plant. The leaf pruning took place between 11 February and 15 February. This is a normal procedure in this type of crop. Plants with hangers always grow vertically once they reach the height limit of the structure.

By removing the leaves at the bottom of the plant, the oldest and most affected by the disease, the level of powdery mildew that we visually appreciated decreased, as can be seen in Figure 8.

With the continuous development of the plant, the disease continued to develop after pruning, reaching levels of development similar to those that existed before pruning. In Figure 8, we observed how the trend of disease before pruning was maintained after this in a similar way.

We can see in Figure 8 how treatment T3-S in “*enarenado*” soil always had a lower percentage of infection than other treatments and for many periods of the statistically differentiated trial of treatment T1-S in “*enarenado*” soil. These two treatments were extreme both in the use of irrigation water and salinity and in the use of nutritional solution. At

2. Efecto de diferentes sustratos, y riego con diferentes concentraciones salinas, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero tipo Almería

this time, the expression of the disease in the leaves (powdery mildew) was the highest in the experiment.

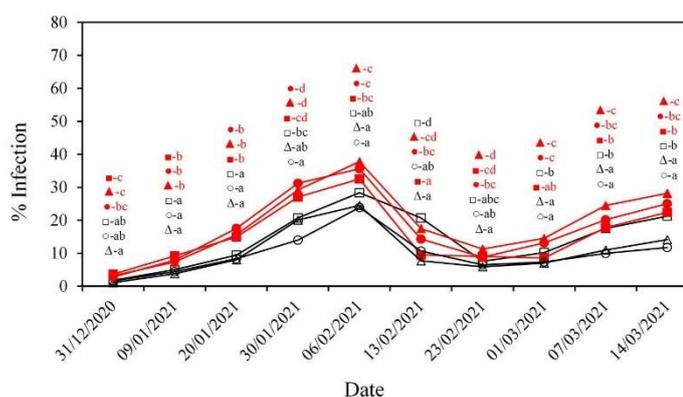


Figure 8. Development of powdery mildew percentage of infection over time in the sectors with different irrigation and crop systems. Treatments: T1-H (■), T1-S (□), T2-H (▲), T2-S (△), T3-H (●) and T3-S (○). S, typical soil substrate “enarenado”; H, coconut fiber substrate. Different letters in the same column show statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (p -value ≤ 0.05).

We can observe that during the evolution of this trial, in “enarenado” soil, treatment T3-S, which presented a lower amount of nutrient solution and, therefore, fewer nitrates, presented in turn a lower percentage of powdery mildew infection. It was also observed that as the nutritional concentration increased, the expression of the disease in the leaves also increased.

Similarly, it was observed that the higher the concentrations of salts in irrigation water (due to NaCl and Ca⁺ and Mg⁺⁺ ions), the lower the percentage of powdery mildew infection observed, in direct contrast to the results observed for the nitrate concentration.

3.3. Effect of Salinity and Diseases on Production and Quality of Tomato Harvest

Table 4 shows the production obtained in this trial. It can be seen that in the first harvest, which coincides with the onset of the diseases (powdery mildew and Fusarium crown and root rot), there were neither statistical nor numerical differences in the yields obtained, with results being very similar for all irrigation systems and substrates used.

The largest harvest took place on 8 February 2021, just before the second occurrence of the Fusarium infection, coinciding with the day of the largest losses due to plant deaths in the crop affected by Fusarium.

However, from the harvest of 18 February 2021 to 9 March 2021, production decreased. These findings coincide with the second increase in disease severity for powdery mildew and Fusarium crown and root rot. The lower production levels were observed in plants grown in coconut fiber (Figure S1). This is due to the losses caused by both diseases in the areas in which the coconut substrate was used, particularly from Fusarium crown and root rot, which killed many plants.

At the first harvest (13 January 2021), the disease should not have had an influence because the disease levels on that date were very low. There were no clear differences between treatments, although a higher numerical incidence of non-marketable fruits was observed in the plots planted in coconut fiber (Table S3). At the second harvest, in which the disease levels were also low, no differences were observed between the treatments; only treatment 1, sown in “enarenado”, was statistically different from the rest, obtaining better results (lower percentage of non-marketable fruits). At the third harvest, where the disease began to be noticed, it appeared as though, numerically, the plots sown in “enarenado”

presented better values and fewer non-marketable fruits, although the lowest value of this crop was found in treatment 3 of those sown in coconut fiber due to the very low yield in these plots.

Table 4. Production and fruit at different harvest times.

Greenhouse	Date				Total
Irrigation	13/01/2021	08/02/2021	18/02/2021	09/03/2021	
Production (kg/m ²)					
T1-S	1.01 ± 0.12 ^a	2.04 ± 0.18 ^{a,b}	1.55 ± 0.17 ^c	0.94 ± 0.10 ^c	5.53 ± 0.31 ^c
T2-S	1.03 ± 0.12 ^a	1.70 ± 0.18 ^a	1.42 ± 0.17 ^{b,c}	0.77 ± 0.10 ^{b,c}	4.93 ± 0.31 ^{a,b,c}
T3-S	1.15 ± 0.12 ^a	2.47 ± 0.18 ^{b,c}	1.00 ± 0.17 ^{a,b}	0.50 ± 0.10 ^{a,b}	5.13 ± 0.31 ^{b,c}
T1-H	1.06 ± 0.12 ^a	1.84 ± 0.18 ^a	0.74 ± 0.17 ^a	0.37 ± 0.10 ^a	4.02 ± 0.31 ^a
T2-H	1.14 ± 0.12 ^a	2.73 ± 0.18 ^c	1.02 ± 0.17 ^{a,b,c}	0.20 ± 0.10 ^a	5.10 ± 0.31 ^{b,c}
T3-H	1.17 ± 0.12 ^a	1.76 ± 0.18 ^a	1.09 ± 0.17 ^{a,b,c}	0.24 ± 0.10 ^a	5.26 ± 0.31 ^{a,b}
Number of fruits harvested					
T1-S	309 ± 45 ^a	771 ± 92 ^{a,b}	648 ± 86 ^b	501 ± 50 ^c	2176 ± 191 ^b
T2-S	373 ± 45 ^a	618 ± 92 ^a	684 ± 86 ^b	356 ± 50 ^{b,c}	2002 ± 191 ^{a,b}
T3-S	379 ± 45 ^a	972 ± 92 ^{b,c}	466 ± 86 ^{a,b}	204 ± 50 ^{a,b}	2014 ± 191 ^{ab}
T1-H	317 ± 45 ^a	726 ± 92 ^{a,b}	328 ± 86 ^a	159 ± 50 ^a	2175 ± 191 ^b
T2-H	369 ± 45 ^a	1191 ± 92 ^c	527 ± 86 ^{a,b}	109 ± 50 ^a	2223 ± 191 ^b
T3-H	364 ± 45 ^a	867 ± 92 ^{a,b}	650 ± 86 ^b	157 ± 50 ^a	2189 ± 191 ^b

T1-S, 0.6 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1.6 dS m⁻¹ EC fertilization in typical soil substrate “enarenado”; T2-S, 1.5 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1 dS m⁻¹ EC fertilization in typical soil substrate “enarenado”; T3-S, 3 dS m⁻¹ EC irrigation water + 0.5 dS m⁻¹ EC fertilization in typical soil substrate “enarenado”; T1-H, 0.6 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1.6 dS m⁻¹ EC fertilization in coconut fiber substrate; T2-H, 1.5 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1 dS m⁻¹ EC fertilization in coconut fiber substrate; T3-H, 3 dS m⁻¹ EC irrigation water + 0.5 dS m⁻¹ EC fertilization in coconut fiber substrate. Values with different letters in the same column show statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (*p*-value ≤ 0.05).

The last two harvests showed the effects of the saline water on the yield due to the salt accumulation in the soil. Soil showed a trend towards obtaining a higher tomato yield in the areas irrigated with less saline water (salinity mainly due to NaCl). This was observed in soil mainly because in soil salts accumulate in superficial areas and are more difficult to leach, thereby increasing the concentration of salts above those applied in the irrigation solution. In the coconut substrate areas, this trend was not particularly observed, with the exception of a slight presence in the last harvest, probably due to the fact that the washing fraction in the coconut fiber was more efficient than in the soil, thereby not producing the same accumulation of salt as in the soil.

Figure 9a also shows the number of fruits harvested. As for production, the effect of salinity and disease stress continued the same trend as in the total production table. In Figure 9a, a high loss in terms of tomato yield is observed in the last harvest in the coconut substrate, mainly due to disease stress.

On the last day of harvest, there was a great loss in the number of fruits collected in the plots in the coconut fiber substrate due to the influence of *Fusarium*, which, at this time of the experiment, showed very high infection percentage values in coconut fiber systems. In addition, the effect of the accumulation of salts on the soil was observed in the “enarenado” soil plots, leading to a lower number of fruits in the plots irrigated with more saline water and less fertilizer because, in these plots, the influence of *Fusarium* was low and there was no difference between irrigation areas.

In Figure 9a, we can see how the production obtained on 9 March 2021 varied depending on the type of treatment and the cultivation system. It was observed that in the case of tomatoes planted in “enarenado”, the production decreased, while the conductivity of the irrigation water of the treatments increased. The production of tomatoes planted in coconut fiber seemed to follow the same trend, but not as clearly as in the case of “enarenado”. In

2. Efecto de diferentes sustratos, y riego con diferentes concentraciones salinas, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero tipo Almería

this graph, a lower level of production is observed in the tomatoes planted in coconut fiber, due largely to the greater presence of plants affected by *F. oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* in the coconut fiber plots.

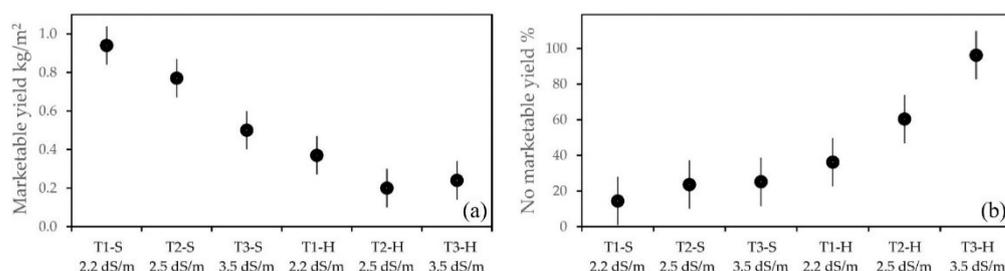


Figure 9. Comparison of the marketable (a) and non-marketable (b) yield in different treatments and crop systems in harvest at 9 March 2021. T1-S, 0.6 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1.6 dS m⁻¹ EC fertilization in typical soil substrate “enarenado”; T2-S, 1.5 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1 dS m⁻¹ EC fertilization in typical soil substrate “enarenado”; T3-S, 3 dS m⁻¹ EC irrigation water + 0.5 dS m⁻¹ EC fertilization in typical soil substrate “enarenado”; T1-H, 0.6 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1.6 dS m⁻¹ EC fertilization in coconut fiber substrate; T2-H, 1.5 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1 dS m⁻¹ EC fertilization in coconut fiber substrate; T3-H, 3 dS m⁻¹ EC irrigation water + 0.5 dS m⁻¹ EC fertilization in coconut fiber substrate.

When comparing the two culture systems (“enarenado” and coconut fiber) that we used in this trial, without differentiating irrigation treatments, it is worth discussing whether the higher incidence of both diseases affected the yield of the crop. When comparing the cropping system, both total and marketable yields were lower for the coconut substrate treatment than for the “enarenado” soil treatment. The difference was significant at the 95% confidence level, however. The method used to discriminate between the means was the Fisher’s least significant difference (LSD) procedure. The marketable yield for the substrate culture was 4.46 kg/m², whereas for “enarenado” soil culture, it was 5.20 kg/m² (Figure S1). One of the most likely contributing factors to this lower yield in coconut fiber system treatments was the considerably higher incidence of both diseases, especially in the case of Fusarium crown and root rot in this type of cropping system.

The development of fungal diseases also influences the quality of the tomatoes obtained. The increased influence of these diseases over time causes production losses due to the appearance of damaged fruits that cannot be sold. In Figure 9b, we can see how the percentage of non-commercial fruits increased over time, while the incidence of both diseases (powdery mildew and Fusarium crown and root rot) also increased their development. More non-marketable fruits were observed in the plots sown in coconut fiber than in “enarenado” soil, being statistically differentiated in some final periods of the harvest (for example, see the three treatments in “enarenado” soil and coconut fiber on 9 March 2021).

On the last day of harvest analyzed, the harvest most affected by the disease, we could also observe an increase in non-marketable production with the increase in the concentration of salts that were introduced to the different substrates by irrigation. Higher percentages of non-commercial fruits were observed in treatment T3 than in treatment T2 and, in turn, in treatment T1. This may be related to the increased salinity, as described earlier in this study.

In the case of non-marketable tomatoes, again, Figure 9b shows the highest values for plots grown in coconut substrate compared to “enarenado” soil, which seems to be clearly related to the severity of the percentage of infection of the analyzed diseases in these areas.

Regarding the quality of the production, the variables related to the size of the fruit (weight and diameter of the fruit) were significantly lower in the coconut fiber culture

treatment than in “enarenado” soil culture (Table 5), which seems to indicate that the higher incidence of both diseases affected the development of the fruit.

Table 5. Fruit weight, diameter and Brix degrees in different harvest times and average value for the crop cycle.

Greenhouse	Date				Average	
	Irrigation	13/01/2021	08/02/2021	18/02/2021		09/03/2021
Fruit weight (g)						
T1-S		126.69 ± 3.83 ^c	102.32 ± 4.36 ^c	92.23 ± 4.04 ^c	72.15 ± 3.07 ^a	98.35 ± 2.65 ^c
T2-S		106.19 ± 3.83 ^a	108.04 ± 4.36 ^c	79.71 ± 4.04 ^{a,b}	82.46 ± 3.07 ^b	94.10 ± 2.65 ^c
T3-S		118.65 ± 3.83 ^{b,c}	99.17 ± 4.36 ^{b,c}	84.10 ± 4.04 ^{b,c}	95.52 ± 3.07 ^c	99.36 ± 2.65 ^c
T1-H		114.63 ± 3.83 ^{a,b}	89.37 ± 4.36 ^{a,b}	81.31 ± 4.04 ^{a,b,c}	84.47 ± 3.07 ^b	92.45 ± 2.65 ^{b,c}
T2-H		113.52 ± 3.83 ^{a,b}	84.49 ± 4.36 ^a	71.82 ± 4.04 ^a	68.33 ± 3.07 ^a	84.54 ± 2.65 ^a
T3-H		112.02 ± 3.83 ^{a,b}	88.51 ± 4.36 ^{a,b}	72.69 ± 4.04 ^a	68.99 ± 3.07 ^a	85.55 ± 2.65 ^{a,b}
Fruit diameter (mm)						
T1-S		66.67 ± 0.79 ^c	59.96 ± 0.91 ^b	57.44 ± 0.99 ^b	51.88 ± 0.82 ^a	58.99 ± 0.68 ^{b,c}
T2-S		62.71 ± 0.79 ^a	61.39 ± 0.91 ^b	55.15 ± 0.99 ^{a,b}	54.48 ± 0.82 ^b	58.43 ± 0.68 ^{b,c}
T3-S		65.36 ± 0.79 ^{b,c}	60.26 ± 0.91 ^b	55.81 ± 0.99 ^b	57.68 ± 0.82 ^c	59.78 ± 0.68 ^c
T1-H		63.77 ± 0.79 ^{a,b}	56.81 ± 0.91 ^b	54.99 ± 0.99 ^{a,b}	55.51 ± 0.82 ^{b,c}	57.67 ± 0.68 ^{a,b}
T2-H		64.85 ± 0.79 ^{a,b,c}	55.71 ± 0.91 ^b	52.61 ± 0.99 ^a	50.99 ± 0.82 ^a	56.04 ± 0.68 ^a
T3-H		64.49 ± 0.79 ^{a,b,c}	56.82 ± 0.91 ^b	52.71 ± 0.99 ^a	51.51 ± 0.82 ^a	56.38 ± 0.68 ^a
Fruit Brix°						
T1-S		4.94 ± 0.12 ^a	6.23 ± 0.19 ^a	6.40 ± 0.17 ^a	6.51 ± 0.12 ^a	6.01 ± 0.11 ^a
T2-S		5.30 ± 0.12 ^{b,c}	5.93 ± 0.19 ^{a,b}	6.26 ± 0.17 ^a	6.89 ± 0.12 ^b	6.09 ± 0.11 ^{a,b}
T3-S		5.58 ± 0.12 ^c	6.78 ± 0.19 ^c	6.57 ± 0.17 ^a	6.49 ± 0.12 ^a	6.35 ± 0.11 ^{b,c}
T1-H		5.45 ± 0.12 ^c	7.08 ± 0.19 ^c	6.48 ± 0.17 ^a	7.04 ± 0.12 ^{b,c}	6.51 ± 0.11 ^{c,d}
T2-H		5.02 ± 0.12 ^{a,b}	6.78 ± 0.19 ^c	7.73 ± 0.17 ^c	7.33 ± 0.12 ^{c,d}	6.71 ± 0.11 ^d
T3-H		5.29 ± 0.12 ^{b,c}	6.73 ± 0.19 ^{b,c}	7.22 ± 0.17 ^b	7.59 ± 0.12 ^d	6.72 ± 0.11 ^d

T1-S, 0.6 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1.6 dS m⁻¹ EC fertilization in typical soil substrate “enarenado”; T2-S, 1.5 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1 dS m⁻¹ EC fertilization in typical soil substrate “enarenado”; T3-S, 3 dS m⁻¹ EC irrigation water + 0.5 dS m⁻¹ EC fertilization in typical soil substrate “enarenado”; T1-H, 0.6 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1.6 dS m⁻¹ EC fertilization in coconut fiber substrate; T2-H, 1.5 dS m⁻¹ EC irrigation water + 1 dS m⁻¹ EC fertilization in coconut fiber substrate; T3-H, 3 dS m⁻¹ EC irrigation water + 0.5 dS m⁻¹ EC fertilization in coconut fiber substrate. Values with different letters in the same column show statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (p -value \leq 0.05).

In Table 5, we can observe the evolution over time of the average weights obtained per fruit in each harvest. We can see how the weight of the fruits decreased over time, which coincided with the increase in the level of fungal diseases in the crop during the development of the cultivation cycle. A lower fruit weight was observed in plants grown in coconut fiber substrate (Figure S2a), which was also the cultivation system with the highest level of fungal diseases described in this study.

Table 5 shows the size of the fruit diameter after harvest, an important parameter in fruit quality, as it influences the commercial classification of these fruits.

The fruit obtained in this crop decreased in size over time. One of the possible causes of this could be the increase in the development of the fungal diseases described in this trial. As in the case of weight, in the plots with the “enarenado” cultivation system, a larger diameter of harvested fruit was generally observed (Figure S2b).

On the contrary, the Brix° of the fruit was significantly higher in the coconut substrate treatment. The trend in Brix degrees was contrary to what was observed in for diameter and fruit weight, as shown in Table 5; in this case, the Brix° of the harvested tomato increased over time and increased with greater plant stress. Table 5 shows how the levels of Brix° were higher in yields obtained in coconut fiber substrates, which, as previously

described, are those that present higher stress in the crop due to the increased development of fungal diseases.

4. Discussion

Tomatoes and most greenhouse vegetables are sensitive to salinity. In many areas in the Almería province, the irrigation water has poor quality, and its electrical conductivity is much higher than 3 dS m^{-1} [2]. However, the aim of this experiment was to accurately analyze the optimal EC when using a blend of desalinated and groundwater.

The farmers of the Almería area usually use their own well water. The water obtained in this manner has high electrical conductivity, between 2.8 and 6.5 dS m^{-1} [2]. The farmers who use the well water mix this resource with water from irrigation communities, with a lower conductivity of 1 dS m^{-1} , when they use seawater in the desalination plant of 1.6 or 2 dS m^{-1} , the normal electrical conductivity supplied by the area's irrigation communities [2].

The fresh fruit yield of tomato grown in simple plastic greenhouses on the Mediterranean coast was reduced by increasing salinity, in accordance with the Maas and Hoffman model [12]. The average EC value for marketable yield was 3.3 dS m^{-1} . Maas and Hoffman [12] reported, for open-field tomatoes grown in soil, an EC of 2.5 dS m^{-1} in saturated soil extract, which is equivalent to 3.8 dS m^{-1} in the soil solution.

Statistically significant differences among treatments were observed for both diseases, powdery mildew and *Fusarium* crown and root rot. In both cases, higher levels of disease were observed in plants grown in coconut fiber than in "enarenado" soil. This may be due to the fact that there is a greater amount of watering in coconut fiber substrata than in "enarenado" soil areas due to more frequent irrigation in hydroponic, soil-free systems than in irrigation with "enarenado" soil. This can cause constant humidity in areas with coconut fiber substrates, which favors the development of fungal diseases.

The development of *F. oxysporum* f. sp. is favored when soil and air temperatures are high, as well as excess irrigation or rainwater, which negatively affect a host's ability to cope with the disease [31]. The pathogen grows rapidly in arid soils, whereas in soils habited by different saprophytic organisms, *F. oxysporum* f. sp. does not develop in a way that risks the crop [32]. In coconut fiber substrates, we find fewer saprophytic organisms with which to compete for space than in the soil, which would favor a faster development of the disease. The damaged roots can also be colonized by secondary pathogens [30,33], which could be the reason for the higher percentage of powdery mildew infection in areas irrigated with coconut fiber substrate, with more *Fusarium* problems than in areas irrigated in "enarenado" soil.

In the case of soilless growing, the sources of primary infection are microconidia transferred from the air [34]. Plants that are aerially infected may still be colonized by *F. oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (FORL) and may infect tomatoes by root-to-root contact and increased inoculum in the substrate for the next season [20]. In our case, the coconut substrate had a lower volume than the "enarenado" soil, so the roots of the plants were nearer than in the "enarenado" soil, which could increase the infection by root-to-root contact in coconut substrate.

It is known that the disease develops rapidly in cool soil [25]. In our trial, the coconut substrate was cooler than soil because the former loses the heat collected during the day by the greenhouse more quickly than the latter, which can encourage the development of the disease.

The excessive use of fertilizers usually causes plants to become more susceptible to disease outbreaks [34]. Treatment T2 is the most balanced in terms of the use of fertilizer because treatment T1 provides more fertilizer than the others, and treatment T3 provides a higher electrical conductivity in the water (possibly due to an excess of NaCl), which weakens the plant's defense against disease. High concentrations of Na^+ or high $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ ratios in the root media imply a low K^+ content in the plant, which has a negative effect on growth and yield in several crops, including tomatoes [35].

The highest level of powdery mildew percentage of infection in the coconut substrate irrigation areas could be due to the fact that the damage that *F. oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* causes in the tomato plants helps secondary pathogens colonization [33].

In addition, according to Koch's postulates, for the correct development of a disease, a healthy host is needed. The plants in coconut substrate in this trial were weaker than those planted in "enarenado" soil. Therefore, the analysis of powdery mildew was better suited to the irrigation "enarenado" soil areas.

For powdery mildew, in general, higher soil nitrogen availability leads to an increase in disease infection [36]. The nitrogen source also affects plant metabolism, changing susceptibility to a pathogen [20,37]. In this trial, we can affirm that a higher concentration of salts (probably NaCl) in the irrigation water and lower nitrogen fertilization decrease the development of *L. taurica* in tomato. Salinity can also directly affect nutrient uptake, such as by Na⁺ reducing K⁺ uptake or by Cl⁻ reducing NO⁻³ uptake [33].

The tomato variety planted in this trial is a long-life variety, which is harvested as a bouquet. The tomatoes were harvested in winter, so they took a longer time to ripen. Harvesting was performed once the bouquet was fully ripe, and it was considered that there was a sufficiently large harvest from all replications to evaluate; for this reason, the harvest dates were irregular.

Compared with soil-based cultivation, hydroponics culture can be more cost-effective [38], producing higher yields and prompter harvests from smaller areas of land. Hydroponics culture also has higher water and nutrient use efficiencies in general [39]. In this trial, however, Figure 9 and Table 5 show that the "enarenado" soil irrigation areas obtained higher production than the coconut fiber substrate; this is due to the losses caused for the different diseases, which showed more severity in the areas of the coconut substrate, especially Fusarium crown and root.

Soil showed a trend towards obtaining a higher tomato yield in the areas irrigated with less saline water (salinity mainly due to NaCl), as described by other authors [9–11]. This was observed in soil mainly because in soil salts accumulate in the superficial part and it is more difficult to leach, increasing the concentration of salts above those applied in the irrigation solution. In the coconut area, this trend was hardly observed, with the exception of a slight presence in the last harvest, probably due to the fact that the washing fraction in the coconut fiber was more efficient than in the soil, not producing the same accumulation of salt as in the soil. We can also assume that diseases did not influence this trend within each substrate, as explained above, if there were clear differences when comparing soil production with that of coconut fiber. In an analysis separating the substrates, soil and coconut fiber, in the last harvest, the influence of the diseases did not affect this previously exposed trend, since for Fusarium there were no statistical differences between the same substrates. In the case of powdery mildew, the infection percentages were very close, and the production values were higher in the areas that presented higher values of powdery mildew. The incidence of both diseases influenced a reduction in the harvest in both cultivation systems, but the trend described above can be attributed to the concentration of salinity in the irrigation water.

Mounet et al. [40] explored transcriptional and metabolic changes in expanding fruit tissues. This tissue expansion process lasts for up to 35 days, so in the last harvest carried out, we could observe the effect of the diseases on the total development of the fruits. From 35 days before the last harvest, the disease infection percentages of the disease increased greatly. This is why the effects of the diseases were especially reflected in the last days of the harvest.

Table 5 shows a reduction in fruit quality parameters that affect market value, since they negatively influence the size classification of marketable fruits [32]. It was clearly observed how the size of the fruits decreased, while the incidence of both fungal diseases studied in this trial increased.

On the contrary, the Brix° of the fruit was significantly higher in the coconut substrate treatment. The stress for the high level of salts in irrigation water increased fruit sugar [32],

which could be due to a decrease in water transported to fruits, with no change in dry matter transport, resulting in higher concentrations of sugar [15,17]. *F. oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* is a pathogen that mainly attacks the root and vascular plant system [28], which could affect the transport of water to the fruits; this could explain the higher level of Brix degrees observed in coconut fiber plots.

In some local Almería areas, to obtain high-quality tomato fruits from local cultivars, high values of electrical conductivity (EC) in the nutrient solution and hydric stress should be maintained throughout the crop cycle [2]. Coconut system plots showed a very high level of Fusarium crown and root rot symptoms, higher than the plots in “enarenado”, in which the effect of Fusarium was very minor. In “enarenado” plots, there was also an increase in Brix degrees over time, which could be due to the accumulation of salts that occur in soils, where the washing of salts is more difficult than in substrates such as coconut fiber.

Brassinosteroids are essential hormones for plants and have multiple roles to induce tolerance to both biotic and abiotic stresses in plants, such as tolerance at high or low temperatures, excess humidity, damages from pesticides, excess salinity and drought [41,42]. The damage caused by these stresses in plants is similar to that caused by fungal diseases, so these hormones also act on the damage caused by the diseases studied in this trial. Brassinosteroids increase biomass, chlorophyll contents, photosynthesis and antioxidants to improve the resistance of plants to stress [43,44]. An excess of Cd ions, increasing brassinosteroid activity, has been documented in tomatoes [45]. The effect of these hormones could be the cause of the increase in Brix° in the tomato crops studied, as the stress produced by fungal diseases that developed on the crop increased. Although in this work no data were recorded that can validate this hypothesis, it is an aspect that should be studied in the future.

5. Conclusions

In this trial, the areas irrigated with coconut fiber favored the development of *F. oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* and *L. taurica*.

The use of a higher fertilization concentration in the nutrient solution in irrigated areas favored the development of *L. taurica*.

The higher concentration of salts in irrigation water (due to NaCl, and Ca²⁺ and Mg²⁺ ions) caused a diminution in the severity of powdery mildew.

F. oxysporum f. sp. *radicis-lycopersici* caused a loss in the production of the areas irrigated in coconut fiber as these were the most affected by the disease.

F. oxysporum f. sp. *radicis-lycopersici* and *L. taurica* caused a reduction in fruit quality parameters that affect market value.

F. oxysporum f. sp. *radicis-lycopersici* and *L. taurica* caused a higher percentage of non-marketable tomato in the areas with major disease severity.

The salinity stress and the stress caused by *F. oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* and *L. taurica* increased the Brix° in tomato harvest.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/agronomy12051050/s1>. Table S1: Percentage of infection of Fusarium crown and root rot in different moment of the trial. Table S2: Percentage of infection of Powdery mildew in different moment of the trial. Table S3: Percentage of no marketable yield in harvest moments. Figure S1: Comparison of the total marketable yield means and 95 percent LSD differences for Coconut Substrate treatment (TH) grouping all the treatments and Soil treatment (TS) grouping all the treatments. Figure S2: Comparison of the Fruit weight (a) and diameter (b) means and 95 percent LSD differences for Coconut Substrate treatment (TH) and Soil treatment (TS).

Author Contributions: Conceptualization, F.D.M.-A., A.L.-M., J.R. and D.L.V.-M.; methodology, F.D.M.-A., A.L.-M. and E.Á.-S.; cultivation monitoring and data collection, E.Á.-S. and P.M.-M.; data analysis, E.Á.-S., A.L.-M. and J.R.; writing—original draft preparation, A.L.-M. and E.Á.-S.; review and editing, F.D.M.-A., D.L.V.-M. and J.R.; project administration, D.L.V.-M. and J.R.; funding acquisition, D.L.V.-M. and J.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was supported by the *Ministerio de Economía, Industria y Competitividad* (MINECO, Spain), the *Agencia Estatal de Investigación* (AEI, Spain) and the *Fondo Europeo de Desarrollo Regional* (FEDER, Europe), which funded the projects GREENPHOC (PID2019-111293RB-I00) and RIDESOST (AGL2017-85857-C2-1-R). Additional support was provided by the European Commission (Europe) (grant LIFE16 ENV/ES/000341, DESEACROP Project).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the Research Centre CIAIMBITAL of the University of Almería (Spain) and the University of Almería—ANECCOOP Foundation for their collaboration and assistance during the development of this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Castilla, N.; Montero, J.I. Environmental control and crop production in Mediterranean greenhouses. *Acta Hort.* **2008**, *797*, 25–36. [CrossRef]
2. Valera, D.L.; Belmonte, L.J.; Molina, F.D.; López, A. *Greenhouse Agriculture in Almería. A Comprehensive Techno-Economic Analysis*; Cajamar Caja Rural: Almería, Spain, 2016; 504p, Available online: <http://www.publicacionescajamar.es/series-tematicas/economia/greenhouse-agriculture-in-almeria-a-comprehensive-techno-economic-analysis/> (accessed on 1 February 2022).
3. González, A.M. *Programas de Riego Para Cultivos Hortícolas en Invernaderos Enarenados en Almería*. Ph.D. Thesis, Universidad Almería, Almería, Spain, 2003. (In Spanish).
4. Pulido-Bosch, A.; Bensi, S.; Molina, L.; Vallejos, A.; Calaforra, J.M.; Pulido-Leboeuf, P. Nitrates as indicator of aquifer inter-connection. Application to the Campo de Dalías (SESpain). *Environ. Geol.* **2000**, *39*, 791–799. [CrossRef]
5. Dukes, M.D.; Zotarelli, L.; Morgan, K.T. Use of irrigation technologies for vegetable crops in Florida. *HortTechnology* **2010**, *20*, 133–142. [CrossRef]
6. Céspedes, A.J.; García, M.C.; Pérez-Parra, J.J.; Cuadrado, I.M. *Caracterización de la Explotación Hortícola Protegida Almeriense*; Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería: Almería, Spain, 2009; 178p. (In Spanish)
7. Yadav, M.R.; Kumar, R.; Ram, H.; Yadav, V.; Yadav, B. Fertigation: An efficient technique for achieving high nutrient use efficiency in crop production system. *Marumegh* **2017**, *2*, 57–61. Available online: <http://www.marumegh.com/images/April-Jun-2017/57-61.pdf> (accessed on 1 March 2022).
8. Incrocci, L.; Massa, D.; Pardossi, A. New trends in the fertigation management of irrigated vegetable crops. *Horticulturae* **2017**, *3*, 37. [CrossRef]
9. Cuartero, J.; Fernandez-Munoz, R. Tomato and salinity. *Sci. Hort.* **1999**, *78*, 83–125. [CrossRef]
10. Flowers, T.J.; Troke, P.F.; Yeo, A.R. The mechanisms of salt tolerance in 348 halophytes. *Annu. Rev. Plant Physiol.* **1977**, *28*, 89–121. [CrossRef]
11. Satti, S.M.E.; Ahmad, R. Salinity tolerance in tomato. *Pak. J. Bot.* **1992**, *24*, 35–39.
12. Maas, E.V.; Hoffman, G.J. Crop salt tolerance: Current assessment. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE* **1977**, *103*, 115–134. Available online: https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/P572.pdf (accessed on 20 March 2022). [CrossRef]
13. Magán, J.J.; Gallardo, M.; Thompson, R.B.; Lorenzo, P. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agric. Water Manag.* **2008**, *95*, 1041–1055. [CrossRef]
14. Santamaria, P.; Campanile, G.; Parente, A.; Elia, A. Subirrigation vs. drip-irrigation: Effects on yield and quality of soilless grown cherry tomato. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* **2003**, *78*, 290–296. [CrossRef]
15. Ehret, D.L.; Ho, L.C. Effect of salinity on dry matter partitioning and growth in tomato grown in nutrient film culture. *J. Hort. Sci.* **1986**, *61*, 361–367. [CrossRef]
16. Flores, P.; Navarro, J.M.; Carvajal, M.; Cerda, A.; Martinez, V. Tomato yield and quality as affected by nitrogen source and salinity. *Agronomy* **2003**, *23*, 249–256. [CrossRef]
17. Willumsen, J.; Petersen, K.K.; Kaack, K. Yield and blossom-end rot of tomato as affected by salinity and cation activity ratios in the root zone. *J. Hort. Sci.* **1996**, *71*, 81–98. [CrossRef]
18. Gao, Z.; Sagi, M.; Lips, S.H. Carbohydrate metabolism in leaves and assimilate partitioning in fruits of tomato (*Lycopersicon esculentum*) as affected by salinity. *Plant Sci.* **1998**, *135*, 149–159. [CrossRef]
19. Plaut, Z.; Grava, A.; Yehezkel, C.; Matan, E. How do Salinity and water stress affect transport of water, assimilates and ions to tomato fruits? *Physiol. Plant.* **2004**, *57*, 245–259. [CrossRef]
20. Sun, Y.; Wang, M.; Mur, L.A.J.; Shen, Q.; Guo, S. Unravelling the roles of nitrogen nutrition in plant disease defences. *Int. J. Mol. Sci.* **2020**, *21*, 572. [CrossRef]
21. Braun, U. *A Monograph of the Erysiphales (Powdery Mildews)*; J. Cramer: Berlin, Germany, 1987; 113p.
22. Hewitt, H.G. *Fungicides in Crop Protection*; CAB International: Wallingford, UK, 1998; 221p.

2. Efecto de diferentes sustratos, y riego con diferentes concentraciones salinas, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero tipo Almería

23. Jones, H.; Whipps, J.M.; Gurr, S.J. The tomato powdery mildew fungus *Oidium neolycopersici*. *Mol. Plant Pathol.* **2001**, *2*, 303–309. [CrossRef]
24. Tsrer, L.; Lebiush, M.S.; Shapira, N. Control of powdery mildew on organic pepper. Management of plant diseases and arthropod pests by BCAs. *IOBC/WPRS Bull.* **2004**, *27*, 333–336.
25. Kim, J.T.; Park, I.H.; Oung, I.H.; Yu, S.H. Crown and root rot of greenhouse tomato caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* in Korea. *Plant Pathol. J.* **2001**, *17*, 290–294. Available online: <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200111920848196.page> (accessed on 20 March 2022).
26. Di Primo, P.; Cartia, G.; Katan, T. Vegetative compatibility and heterokaryon stability in *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* from Italy. *Plant Pathol.* **2001**, *50*, 371–382. [CrossRef]
27. Jarvis, W.R.; Shoemaker, R.A. Taxonomic status of *Fusarium oxysporum* causing foot and root rot of tomato. *Phytopathology* **1978**, *68*, 1679–1680. [CrossRef]
28. Steinkellner, S.; Mammerler, R.; Vierheilig, H. Microconidia germination of the tomato pathogen *Fusarium oxysporum* in the presence of root exudates. *J. Plant Interact.* **2005**, *1*, 23–30. [CrossRef]
29. Sonneveld, C.; Straver, N. Nutrient solutions for vegetables and flower grow in water or substrates. *Proefstn. Voor Tuinbouw Onder Glas.* **1994**, *8*, 33.
30. Jones, J.B.; Jones, J.P.; Stall, R.E.; Zitter, T.A. *Compendium of Tomato Diseases*; APS Press: St. Paul, MN, USA, 1991; 100p.
31. Lacey, J.; Magán, N. Fungi relationships in cereal grains: Their occurrence and water and temperature. In *Cereal Grain. Mycotoxins, Fungi and Quality in Drying and Storage*; Chelkowski, J., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1991; pp. 77–118.
32. Ślusarski, C. Soil diseases of tomatoes (part II). In soilless cultivation under cover. *Gard. Entry* **2000**, *2*, 46–49.
33. Kamilova, F.; Kravchenko, L.V.; Shaposhinkova, A.I.; Makarova, N.; Lugtenberg, B. Effect of tomato pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* and of the biocontrol bacterium *Pseudomonas fluorescens* WCS365 on the composition of organic acids and sugars in tomato root exudates. *Mol. Plant Microbe Interact.* **2006**, *19*, 1121–1126. [CrossRef] [PubMed]
34. Rekah, Y.; Shtienberg, D.; Katan, J. Spatial distribution and temporal development of fusarium crown and root-rot of tomato and pathogen dissemination in field soil. *Phytopathology* **1999**, *89*, 831–839. [CrossRef]
35. Lopez, M.V.; Satti, S.M.E. Calcium and potassium-enhanced growth and yield of tomato under sodium chloride stress. *Plant Sci.* **1996**, *114*, 19–27. [CrossRef]
36. Fondevilla, S.; Rubiales, D. Powdery mildew control in pea. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2012**, *32*, 401–409. [CrossRef]
37. Yermiyahu, U.; Halpem, M.; Shtienberg, D. NH₄ fertilization increases susceptibility of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) to grey mould (*Botrytis cinerea*) due to decrease in Ca uptake. *Phytoparasitica* **2020**, *48*, 685–697. [CrossRef]
38. Grafiadellis, I.; Mattas, K.; Maloupa, E.; Tzouramani, I.; Galanopoulos, K. An economic analysis of soilless culture in Gerbera production. *HortScience* **2000**, *35*, 300–303. [CrossRef]
39. van Os, E. Closed soilless growing systems: A sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture. *Water Sci. Technol.* **1999**, *39*, 105–112. [CrossRef]
40. Mounet, F.; Moing, A.; Kowalczyk, M.; Rohrmann, J.; Petit, J.; García, V. Down-regulation of a single auxin efflux transport protein in tomato induces precocious fruit development. *J. Exp. Bot.* **2012**, *63*, 4901–4917. [CrossRef] [PubMed]
41. Divi, U.K.; Krishna, P. Brassinosteroid: A biotechnological target for enhancing crop yield and stress tolerance. *New Biotechnol.* **2009**, *26*, 131–136. [CrossRef] [PubMed]
42. Hasan, S.A.; Hayat, S.; Ahmad, A. Brassinosteroids protect photosynthetic machinery against the cadmium induced oxidative stress in two tomato cultivars. *Chemosphere* **2011**, *84*, 1446–1451. [CrossRef]
43. Ahammed, G.J.; Gao, C.J.; Ogwen, J.O.; Zhou, Y.H.; Xia, X.J.; Mao, W.H.; Shi, K.; Yu, J.Q. Brassinosteroids induce plant tolerance against phenanthrene by enhancing degradation and detoxification in *Solanum lycopersicum* L. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2012**, *80*, 28–36. [CrossRef]
44. Choudhary, S.P.; Yu, J.-Q.; Yamaguchi-Shinozaki, K.; Shinozaki, K.; Tran, L.S. Benefits of brassinosteroid crosstalk. *Trends Plant Sci.* **2012**, *17*, 594–605. [CrossRef]
45. Golam, J.A.; Choudhary, S.P.; Chen, S.; Xia, X.; Shi, K.; Zhou, Y.; Yu, J. Role of Brassinosteroids in Alleviation of Phenanthrene-Cadmium Co-Contamination-Induced Photosynthetic Inhibition and Oxidative Stress in Tomato. *J. Exp. Bot.* **2013**, *64*, 199–213. [CrossRef]

3. Influencia de la difusividad y transmitancia de un plástico de cubierta de invernadero sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en un cultivo de pepino

Resumen

Los invernaderos mediterráneos están normalmente cubiertos por materiales plásticos, estos materiales dejan pasar la luz a través de ellos modificando algunas de sus características. Las propiedades de las cubiertas plásticas de los invernaderos influyen en el desarrollo de los cultivos. Además, las cubiertas de invernadero, pueden influir en el estrés a los que se enfrentan las plantas y el desarrollo de enfermedades fúngicas. El propósito de este trabajo es analizar el efecto que tiene una cubierta plástica experimental, con alta transmitancia y difusividad de la luz, produce sobre un cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.). Se compararon dos cubiertas plásticas: (i) plástico comercial (transmitancia de 85 % y difusividad de 60 %); y (ii) una cubierta plástica experimental (transmitancia de 90 % y difusividad de 55 %). El ensayo se llevó a cabo en dos ciclos de otoño-invierno en un invernadero multitúnel separado en dos sectores experimentales aislados. Tres enfermedades causaron los daños más importantes sobre los cultivos de pepino: mildiús (*Pseudoperonospora cubensis*), oídio (*Sphaerotheca fuliginia*) y tizón del tallo gomoso (*Didymella bryoniae*). Oídio produjo más daños en los sectores cubiertos con el plástico comercial, comparado con el experimental, encontrándose diferencias estadísticamente significativas en los dos ciclos de cultivo. Mildiús y tizón del tallo gomoso tuvieron menos presencia que el oídio, y otra vez la incidencia de estas dos enfermedades fue mayor en el sector cubierto con el plástico comercial, observándose estas diferencias también en los dos ciclos de cultivo.

Palabras clave: invernadero, *Cucumis sativus* L., plástico difuso, transmitancia en plásticos, enfermedades fúngicas.

Article

Influence of the Diffusivity and Transmittance of a Plastic Greenhouse Cover on the Development of Fungal Diseases in a Cucumber Crop

Eugenio Ávalos-Sánchez ¹, María Ángeles Moreno-Teruel ^{1,2}, Francisco Domingo Molina-Aiz ¹, Alejandro López-Martínez ^{1,*}, Araceli Peña-Fernández ¹, Fátima Baptista ² and Diego Luis Valera-Martínez ¹

¹ Research Centre CIAIMBITAL, University of Almería, Ctra. de Sacramento s/n, 04120 Almería, Spain

² MED—Instituto Mediterrâneo Para a Agricultura, Ambiente e Desenvolvimento, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, 7000-849 Évora, Portugal

* Correspondence: alexlopez@ual.es

Citation: Ávalos-Sánchez, E.; Moreno-Teruel, M.Á.; Molina-Aiz, F.D.; López-Martínez, A.; Peña-Fernández, A.; Baptista, F.; Valera-Martínez, D.L. Influence of the Diffusivity and Transmittance of a Plastic Greenhouse Cover on the Development of Fungal Diseases in a Cucumber Crop. *Agronomy* **2022**, *12*, 2743. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112743>

Academic Editor: Adrian C. Newton

Received: 11 October 2022

Accepted: 3 November 2022

Published: 4 November 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Mediterranean greenhouses are usually covered by plastic materials (films); these films allow light to pass through them, modifying some of their characteristics. The properties of the plastic cover influence the development of greenhouse crops. In addition, it can influence the stresses that the plants endure and the development of fungal diseases in the crop. The aim of this study is to analyze the effect that an experimental film cover, with high transmittance and high light diffusivity, produces on the development of fungal diseases on a cucumber crop (*Cucumis sativus* L.). Two different film covers were compared: (i) commercial film (transmittance of 85%; diffusivity of 60%); and (ii) experimental film (transmittance of 90%; diffusivity of 55%). The study was carried out across two autumn–winter crop cycles in a multi-span greenhouse divided into two isolated sectors. Three fungal diseases caused the main damage to the cucumber crop: downy mildew (*Pseudoperonospora cubensis*), powdery mildew (*Sphaerotheca fuliginea*) and gummy stem blight (*Didymella bryoniae*). In the case of powdery mildew, a greater severity in the sector was observed with the commercial film in comparison with the sector with the experimental film, with significant statistical differences between the two sectors in both crop cycles. Downy mildew and gummy stem blight were fungal diseases with less presence than downy mildew, and a greater presence of these two fungal diseases in the sector with the commercial film was also observed in both crop cycles.

Keywords: greenhouse; *Cucumis sativus* L.; diffuse film; transmittance film; fungal diseases

1. Introduction

Solar greenhouses, characteristic of the Mediterranean coast, use passive climate control systems, which do not require external energy inputs, such as electricity or gas. With the energy of the sun or natural winds, Mediterranean greenhouses achieve climate control that is less expensive in terms of inputs. Mediterranean greenhouses are mostly covered with plastic films, which have passive systems for climate control; some of the plastic covers materials are infrared reflective films and are interesting materials that allow an increase in PAR transmission and optimal near infrared reflection, which can improve the air temperature management [1].

The type of covering material influences the energy consumption, performance and overall economy of greenhouses. A better understanding of the properties of these materials is of great importance to both researchers and farmers [2]. The physical properties of the cover material influence the quality of the indoor microclimate [3]. Transmittance is considered one of the most important physical properties; the characteristic values of transmittance in plastic films vary between 70–90%. The ideal material has to allow 100%

of the transmission of photosynthetically active radiation, which is what plants use effectively in the photosynthesis process [2].

Innovative greenhouse covering materials have been developed that transform direct radiation from the sun into diffuse radiation, which once inside the greenhouse is dispersed and reaches the crop areas that absorb it to perform photosynthesis [4]. Crops take better advantage of diffuse radiation, allowing for better photosynthetic performance in areas of the plant that under normal conditions would have lower photosynthetic performance. [5]. Greenhouses covered with plastics that improve light transmission and diffusion, better distribute light within the crop canopy, reduce stress from high temperatures and increase fruit yield and quality [6]. The distribution of light in the canopy is influenced by the direction of the light and by the fraction of diffused/direct light that falls on the canopy but also depends on the architecture of the crop [7]. Under the influence of cover materials that increase diffuse light, leaf photosynthesis can be 10–15% higher, suggesting that direct and diffuse light affect photosynthetic processes differently [8,9]. With diffuse cover materials (capable of transforming 45–71% of direct light into diffuse light), the light profiles are more homogeneous, increasing crop yield and growth [7,10,11]. In addition, tomato fruit weight increased by 5 g [12] and by 5–8 g [13] under high diffusivity materials.

The plastic covers of greenhouses clearly influence the production and quality of the fruits produced in them, so that the amount of light that reaches the crops before harvest influences the increase in lycopene biosynthesis. Thus, the fruits that receive the greatest amount of light accumulate greater amounts of lycopene, which gives the fruits a better coloration and better quality, both visually and organoleptically [14].

In greenhouses, there are favorable environments for the development of pests on the crop, due to the warm and humid environment that exists under the plastic covers. The plastic covers of Mediterranean greenhouses often favor condensation on the inner surface of the plastic cover, which increases the ambient humidity and can cause this condensed water to fall on the crop, which favors the proliferation of phytopathogenic fungi on the crop [15]. The fall of the condensed water in the plastic cover of the greenhouses on the crops, which are developed inside, favors the development of fungi that parasitize the cultivated plants, causing a yield loss in the crops, in addition to the depreciation of the fruits due to loss of quality, causing serious losses to growers [16]. Interfering in the development of the pathogen cycle is important in any integrated pest management (IPM) strategy. One of the ways to interfere with the environmental conditions of greenhouses is to modify the spectral properties of the greenhouse film cover, which, in turn, affects the development of some pathogens on the plant [17].

Light has an important effect on the formation of the conidia of some fungi; the exposure of the mycelia to ultraviolet light or blue light affects the development of the fungus [18]. It is known that greenhouse cover films, which block or decrease ultraviolet radiation [19], prevent the sporulation of various phytopathogenic fungi [20].

Two of the most frequent fungal diseases in the Mediterranean area are downy mildew and powdery mildew. In greenhouses, the cucurbits crops are normally threatened by different fungi, which belong to the powdery mildews [21]. The attacks of these fungi cause significant economic damage to production, reducing crop yields [22]. The symptoms of the disease are characterized by a growth of fungi, and it appears that white powder develops on the surface of the leaves, petioles and stems, while hardly on the fruits. These diseases can reduce plant growth, produce premature drying of leaves and, subsequently, cause a reduction in the quality and marketability of fruits. Powdery mildew in cucurbits can develop at the beginning of crop production and can rapidly colonize plant tissues [23].

Downy mildew, caused by the fungus *Pseudoperonospora cubensis*, is one of the most dangerous diseases that attack cucumber and other cucurbits, causing serious losses in the harvest of their crops [24]. The symptoms of this disease can be found on true leaves, in geometric shapes on the adaxial surface of the leaves, limited by the leaf veins. The

lesions begin with angular watery spots, which first develop into chlorotic spots that end up necrotizing and can necrotize the leaf completely [25]. A reduced canopy leads to the interruption of fruit development and increases the exposure of the fruits to the sun, which could lead to sunburn and secondary rot [26]. Finally, crop yields and fruit quality are affected by downy mildew [25].

The fungus *Didymella bryoniae* is a pathogen that universally affects cucurbit crops, causing gummy stem blight (GSB), which can affect the host at any stage of its growth and development, affecting stems, leaves and fruits [27]. This pathogen can cause damage and spots on the leaves and black rot on the fruits [28], which can cause many economic losses during the storage of the fruits [29]. The damage begins with yellowing on the margins of the leaves; this yellowing progresses until the leaf ages, gradually causing necrosis until the total death of the plant; these symptoms develop rapidly with favorable environmental conditions for the fungus [30]. There are previous studies that relate the development of the mycelium of pathogenic fungi, such as powdery mildew, depending on the qualities of the light received by the crops [17].

In this study, our objective was to analyze the performance of an experimental film (with high PAR radiation transmissivity and high diffusivity), compared to a commercial film cover on fungal disease development, crop yield and production quality parameters in a cucumber crop (*Cucumis sativus* L.) in a Mediterranean greenhouse.

2. Materials and Methods

2.1. Description of the Experimental Greenhouse

The experimental work was carried out in a multi-span Mediterranean greenhouse of five modules (1800 m²) with natural ventilation, placed in the experimental station “Catedrático Eduardo Fernández” of the University of Almería (latitude: 36°51′ 53.2″ N longitude: 2°16′ 58.8″ W; altitude: 87 m). The greenhouse was divided transversally by a vertical plastic sheet that constituted two independent sectors with similar characteristics (Table 1). In the west sector, the experimental film (E_F) was located, while the east sector was where the commercial film (C_F) was located. The east sector with C_F was the control sector. The experimental film was developed by POLITIV EUROPA S.L. (Israel). The work was carried out in two autumn–winter crop cycles (2020–2021 and 2021–2022); in the first cycle, the greenhouse only had roof vent (vents in all modules), while in the second crop cycle, ventilation was increased due to the side vents (Table 1). To protect the crop against insect pest, insect-proof screens (10 × 20 threads cm⁻²) were installed in the vents.

Table 1. Characteristics of the two sectors of the experimental greenhouse. L_G, length [m]; W_G, width [m]; S_C, crop area [m²]; S_V, vent opening area [m²]; S_V/S_C, ventilation surface percentage [%].

Sector	Plastic Cover	L _G × W _G	S _C	20–21 Crop Cycle		21–22 Crop Cycle	
				S _V	S _V /S _C	S _V	S _V /S _C
West	E _F	40 × 25	1000	109.1	10.9	232.2	23.2
East	C _F	40 × 20	800	84.9	10.6	193.9	24.2

The optical properties of the film covers were provided by the manufacturer (Table 2) and were determined according to the regulations UNE-EN 13,206 [31] and ASTM D 1003-13 [32].

Table 2. Optical properties of plastic cover films. T_{PAR} , transmission of photosynthetically active radiation [400–700 nm]; T_{UV} , transmission of ultraviolet light [300–380 nm]; D , diffusion of light; T , thermal efficiency.

Plastic Cover	T_{PAR}	T_{UV}	D	T
Diffuse experimental film	0.90	0.24	0.55	0.90
Diffuse commercial film	0.85	0.24	0.60	0.85

2.2. Crop System

To study the influence of different film on cucumber crop (*Cucumis sativus* L.), two consecutive autumn–winter crop cycles were carried out with the commercial variety In-sula (Rijk Zwaan Ibérica, S.A., Almería, Spain). The transplant of both crops was carried out in the first week of September in “arenado” sand mulched soil, typical of greenhouses in Almería [33]. The plant density was 1.2 plants/m², with localized drip irrigation. The crop lines were established perpendicular to the greenhouse ridges. The irrigation scheduling method was the same in both greenhouse sectors.

2.3. Plant Diseases Development Quantification

The identification of the fungi, which causes the disease, was carried out by direct observation. Mycelia, spores and conidia were then observed under the microscope [34]. The analysis of each of the diseases was obtained by means of the percentage values of damage per leaf, for each disease. Fifty random leaves were analyzed in each plot and for each disease, obtaining a total of 200 samples for each disease and for each study area (Figure 1). The diseases were evaluated every 7 days from the beginning of the first symptoms, thus, obtaining the evolution of the development of the damages produced by each disease during the two crop cycles. The diseases studied were not inoculated, since they are endemic to the area and usually appear every year, but they did not appear at the same time, because the disease depended on the environmental conditions and the state of the host plants each year. For this reason, the evaluations at certain points did not coincide, since it can be the case that one of the diseases developed at different times from another, which, on the other hand, is completely normal, since the diseases required slightly different environmental conditions and host susceptibility for each one of the diseases studied. For this reason, the crops were monitored until the first symptoms of each of the diseases were detected; following this occurrence, the diseases were monitored weekly.

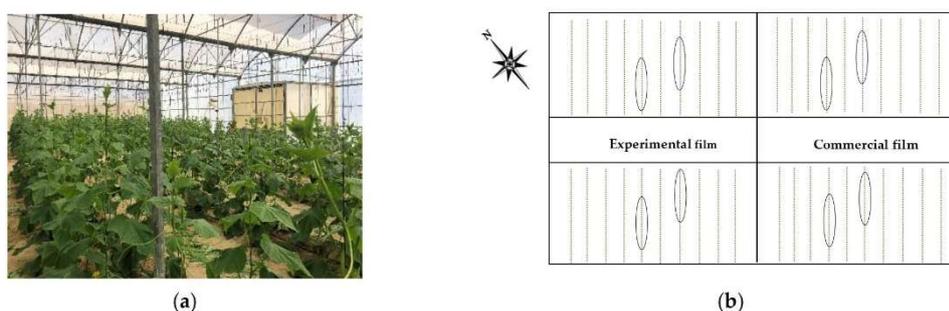


Figure 1. Detail of cucumber crop (a) and distribution of the evaluation plots in each experimental sector (b).

For trial design, the European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) standards were followed. For downy mildew and powdery mildew diseases, EPPO standards PP 1/181 (conduct and reporting of efficacy evaluation trials), PP 1/152

(design and analysis of efficacy evaluation trials), PP 1/57 (powdery mildew on cucurbits) and PP 1/65 (downy mildew of lettuce and other vegetables, PSPECU) are applicable. Disease development was monitored in 4 plots with 4 replicates of 12 plants for each of the experimental sectors (Figure 1). The plots chosen were away from the edges of the plantation to avoid the edge effect.

2.4. Yield and Fruit Quality Measurements

Four crop lines were selected in each sector (considered statistical repetitions). Marketable yield was measured every day of collection with a Mettler Toledo electronic scale (Mettler-Toledo, S.A.E., L'Hospitalet de Llobregat, Spain; sensitivity of 20 g and maximum capacity of 60 kg).

To evaluate the quality of the harvested fruits, 10 cucumbers (each harvest day) from each of the experimental sectors were randomly selected. The weight of the cucumber fruits was measured with a PB3002-L Delta Range® scale (Mettler Toledo, SA, Spain; measuring range from 0 to 3200 g and sensitivity of 0.01 g). The equatorial diameter of the fruit was measured with a digital caliber (Medid Precision, SA, Barcelona, Spain; measuring range of 0–150 mm and resolution of 0.01 mm), the length of the fruit was measured with a tape. To know the soluble solids content, several drops of cucumber juice were placed in a PAL1 refractometer (Atago Co., LTD., Saitama, Japan; measuring range of 0 to 53.0 °Brix and an accuracy of ± 0.2 °Brix).

2.5. Statistical Analysis

Statistical analysis was carried out with Statgraphics Centurion v.19 software (Manugistics Inc., Rockville, MD, USA). We used an analysis of variance (considered significant when p value ≤ 0.05) and we compared the mean values with Fisher's minimal significant difference (LSD) method. Bartlett, Cochran and Hartley tests were also used to determine variations of similar parameters. When there was a statistically significant difference between standard deviations, parametric analysis by analysis of variance was not feasible. In this case, a non-parametric analysis was performed with the Friedman test, in which each row represents a block (the measurement date) using the box and whiskers diagram [35].

3. Results

3.1. Development of Diseases

The results show the development of the three diseases evaluated in two cucumber crops planted on similar dates in two consecutive winter–autumn crop cycles. Due to the climatic conditions, the first disease that appeared was downy mildew (pathogen *Pseudoperonospora cubensis*), then gummy stem blight (pathogen *Didymella bryoniae*) and the last one was powdery mildew (pathogen *Sphaerotheca fuliginea*), but at some points of the evaluation, the damage of the three diseases was observed at the same time on a plant (Figure 2). The first symptom of the disease was noticed in November 2020 for the first cycle and end of October 2021 for the second cycle.



Figure 2. Cucumber leaves affected for different study diseases.

The most important disease in both cycles was powdery mildew; however, for the first crop cycle, downy mildew reached infection rates similar to powdery mildew. These infections were very dangerous for the correct development of the crop; powdery mildew and downy mildew significantly affected yield.

In the second crop cycle, statistically significant differences were observed in the three fungal diseases studied, while in the first crop cycle, only statistically significant differences were observed in the incidence of powdery mildew. The incidence of the fungal diseases studied was generally lower in the greenhouse sector with the experimental film, compared to the commercial film (Table 3).

Table 3. Average value of percentage of infection at the end of the trials in both sectors of the experimental greenhouse.

Sector	Powdery Mildew <i>S. fuliginea</i>	Downy Mildew <i>P. cubensis</i>	Gummy Stem Blight <i>D. bryoniae</i>
End of first crop cycle (24 December 2020)			
C _F	34.11 ^b ± 30.32	19.05 ^a ± 23.37	7.69 ^a ± 19.30
E _F	12.38 ^a ± 21.18	15.79 ^a ± 23.78	8.94 ^a ± 20.18
End of second crop cycle (18 December 2021)			
C _F	45.22 ^b ± 34.93	47.14 ^b ± 35.07	32.74 ^b ± 37.58
E _F	19.49 ^a ± 24.17	37.86 ^a ± 33.27	25.71 ^a ± 33.15

Values with different letters in the same column show statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (p -value ≤ 0.05).

For the last evaluation carried out in each crop cycle, a higher level of development of the three diseases studied was observed in the greenhouse sector that was covered with commercial film (C_F), in comparison with the experimental film (E_F). For the first crop cycle, gummy stem blight showed no differences between the two sectors of the experimental greenhouse, possibly due to the low level of infection observed.

3.1.1. Powdery Mildew

For the two crop cycles, the evaluation for powdery mildew infection (*S. fuliginea*, SPHRFU) began in the month of December. At the beginning of the evaluation, with a low level of powdery mildew infection, no differences were observed between the two experimental sectors in the second crop cycle, but statistically significant differences were observed in the first one. For the two crop cycles, from approximately the first ten days of December, the presence of powdery mildew in the two sectors of the greenhouse began to differentiate (Figure 3). Near to the end of the two crop cycles, for the commercial film, we observed infection rates higher in approximately 30%, in comparison with the experimental film (Figure 3). For the two crop cycles, the development of powdery mildew was

3. Influencia de la difusividad y transmitancia de un plástico de cubierta de invernadero sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en un cultivo de pepino

higher with the commercial film, in comparison with the experimental film, with statistically significant differences.

3.1.2. Downy Mildew

The evaluation for downy mildew infection (*P. cubensis*, PSPECU) began in November for the first crop cycle and in October for the second crop cycle, when the first symptoms of the disease appeared. At the beginning of the disease assessment, at low levels of infection, no statistically significant differences were observed between the two experimental sectors. (Figure 4). In the first cycle, we found statistical differences in the central evaluations (10 and 17 December); in the last evaluation, no differences were observed but there was more downy mildew development numerically in the standard plastic.

For the second crop cycle, downy mildew was more aggressive and began the attack on the crop earlier, in comparison with the first crop cycle. For both crop cycles, there was a one week period when there was a significant increase in damage, from December 3 to 10 in 2020 and from November 30 to October 6 in 2021, after which the damage increases more slowly.

Figure 4 shows that, for downy mildew, we found a lower level of infection with the experimental film (E_F), in comparison with the commercial film (C_F), with statistically significant differences.

Like powdery mildew, downy mildew (*P. cubensis*) also appeared naturally in the specific case of this study, proceeding in a similar way to powdery mildew.

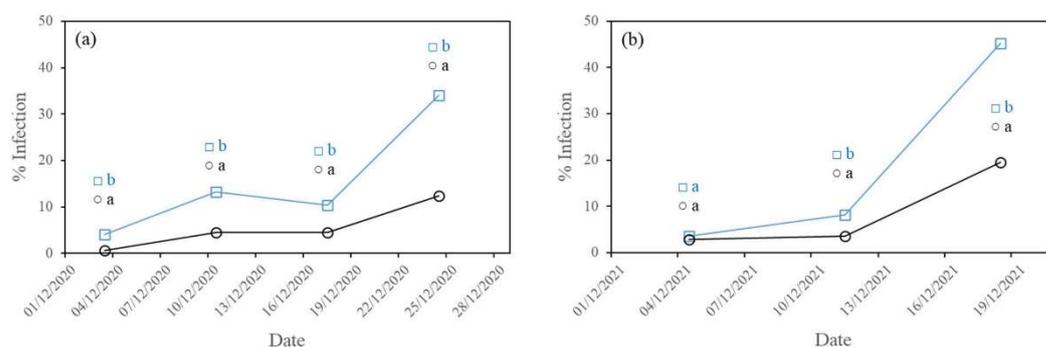


Figure 3. Development of powdery mildew (*S. fuliginea*) percentage of infection over time, for the first crop cycle (a) and for the second crop cycle (b). Sector with commercial film C_F (□); Sector with experimental film E_F (○). Different letters indicate statistically significant difference (p -value ≤ 0.95).

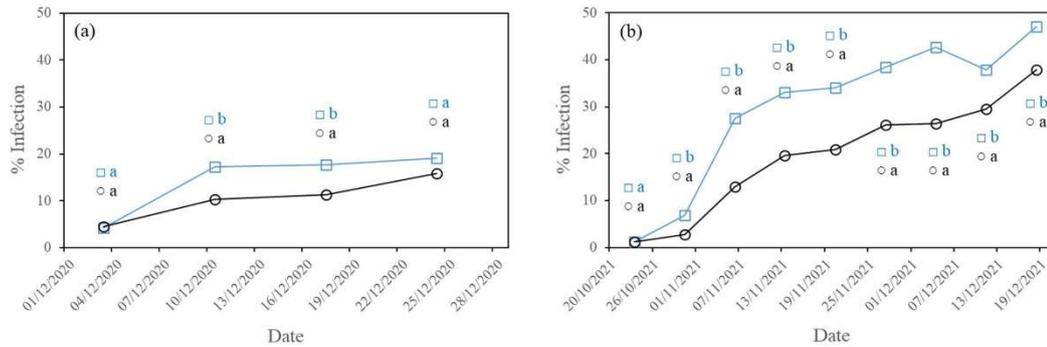


Figure 4. Development of downy mildew (*P. cubensis*) percentage of infection over time, for the first crop cycle (a) and for the second crop cycle (b). Sector with commercial film C_F (□); Sector with experimental film E_F (○). Different letters indicate statistically significant difference (p -value ≤ 0.95).

3.1.3. Gummy Stem Blight

For both crop cycles, the first symptoms of gummy stem blight (*D. bryoniae*) appeared at the end of November and its development was less than that of the other fungal diseases evaluated. In the first crop cycle, in general, no statistically significant differences were found; isolated periods of statistically significant differences appeared on the second day of assessment only (Figure 5a). For the second crop cycle, a higher level of gummy stem blight was observed in comparison with the first crop cycle (Figure 5b), as was also the case with the other two fungal diseases studied. The gummy stem blight of the stem in the second crop cycle showed a lower level of infection with the experimental film, compared to the commercial film, with statistically significant differences (Figure 5b).

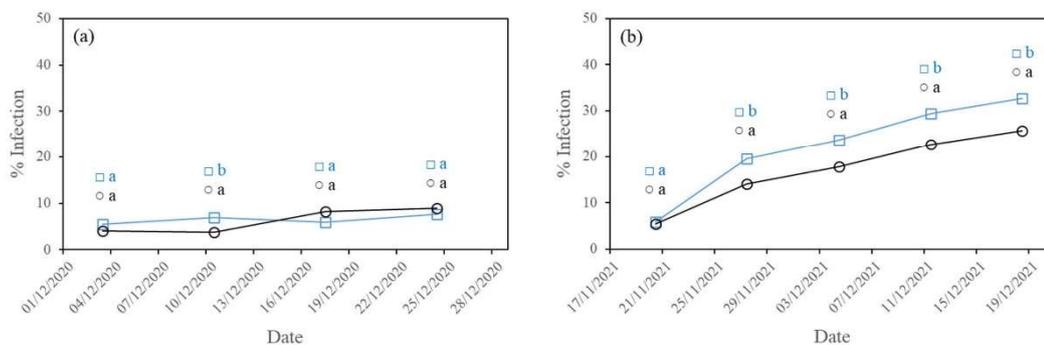


Figure 5. Development of gummy stem blight (*D. bryoniae*) percentage of infection over time, for the first crop cycle (a) and for the second crop cycle (b). Sector with commercial film C_F (□); Sector with experimental film E_F (○). Different letters indicate statistically significant difference (p -value ≤ 0.95).

3.2. Yield and Fruit Quality

During the second crop cycle, the development of fungal diseases was faster than during the first crop cycle, reaching higher crop damage at earlier dates. This higher level

3. Influencia de la difusividad y transmitancia de un plástico de cubierta de invernadero sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en un cultivo de pepino

of disease could be the cause of considerable crop losses; the marketable harvest obtained in the first crop cycle was higher than that obtained in the second one (Figure 6). In both crop cycles, the harvest obtained with the experimental film (E_f) was higher than that obtained with the commercial film (C_f) (Figure 6). In the first crop cycle, similar production values were observed (no statistically significant differences), while in the second crop cycle, there were significantly higher values with the experimental film (statistically significant differences on specific dates) (Figure 6).

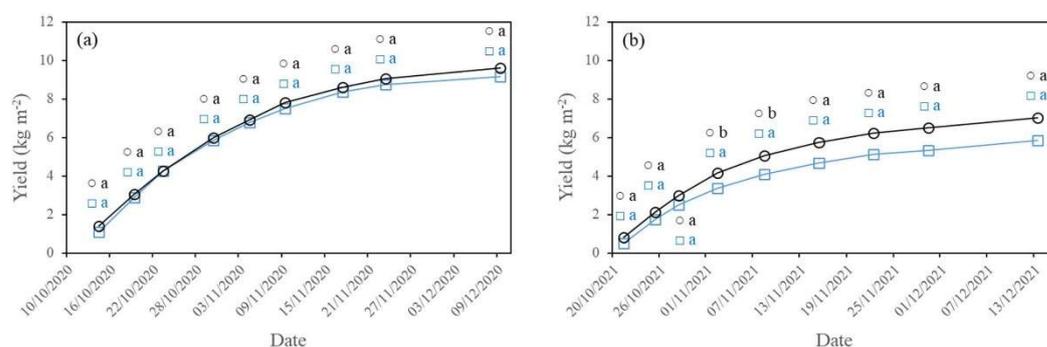


Figure 6. Cumulative production yield over time for the first crop cycle (a) and for the second crop cycle (b). Sector with commercial film C_f (\square); Sector with experimental film E_f (\circ). Different letters indicate statistically significant difference (p -value ≤ 0.95).

The statistical analysis of the quality parameters of the fruit did not show statistically significant differences between the two experimental sectors tested in the two crop cycles (Table 4). During the first crop cycle, the main differences were observed in the parameters weight and equatorial diameter, both were slightly higher under the influence of commercial film, but, as with the two previous parameters, no statistically significant differences were found. The length of the fruits was practically the same in the fruits harvested in both experimental sectors (Table 4). In the case of this crop cycle, fungal diseases do not seem to have influenced the quality of the harvested cucumber fruits.

In the second crop cycle, the fruit quality parameters also showed no statistically significant differences between the harvested fruits in both experimental sectors. It is worth noting the values of the weight of the fruit; albeit without statistically significant differences, the cucumbers harvested under the experimental film were notably higher. The diameter is also slightly larger in this experimental sector, while the rest of the parameters showed similar values (Table 4). Fungal diseases had a higher incidence with the commercial film, so it could have harmed the quality of the harvested fruits (Figures 3–5).

Table 4. Average values of production quality parameters, measured for plants grown in areas with different cover film.

Sector	Weight, [g]	Diameter, [mm]	Length, [cm]	Soluble solids, [°Brix]
2020–2021 Crop cycle				
C_f	474.3 \pm 105.4	33.8 \pm 4.0	44.4 \pm 2.7	3.7 \pm 0.8
E_f	463.0 \pm 80.9	32.8 \pm 3.1	44.7 \pm 4.3	3.4 \pm 0.5
2021–2022 Crop cycle				
C_f	399.5 \pm 73.9	41.5 \pm 3.7	33.4 \pm 2.2	2.9 \pm 0.4

E_F	427.7 ^a ± 99.6	42.5 ^a ± 3.8	33.9 ^a ± 2.8	2.8 ^a ± 0.4
-------	---------------------------	-------------------------	-------------------------	------------------------

Values with different letters in the same column show statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (p -value ≤ 0.05).

4. Discussion

Table 3 shows a higher level of infection of the three diseases studied in the greenhouse with the commercial film C_F , in comparison with the sector with the experimental film E_F , being able to relate the development of diseases with the incidence of light radiation. This difference could be due to the higher light transmission of the experimental film (transmission of photosynthetically active radiation PAR of 90%), compared to that of the commercial film (transmission of photosynthetically active radiation PAR of 85%).

The highest difference in the development of diseases is in the case of powdery mildew, perhaps because this disease was more affected by the light that reached the crop (Table 3). It is known that the development of downy mildew and gummy stem blight are greatly affected by the need for high environmental humidity [36–38].

For the first crop cycle, and with low levels of presence of gummy stem blight, it was observed that there were no statistically significant differences between the percentages of infection in the two greenhouse sectors. However, with a higher level of this disease, it was observed that there were statistically significant differences between the percentages of infection in the two greenhouse sectors, as occurred at the end of the second crop cycle.

The quality of the light that reaches the crops can influence the development of powdery mildew in cucumber [39]. As observed in Figure 3 and in Table 2, with the commercial film, a greater development of the disease was observed.

The two sectors of the experimental greenhouse only differ in the type of film cover used, so these differences in the development of powdery mildew can be explained by the different radiation entering the greenhouse.

Humidity above 90% and the presence of free water in the leaves of the crop favor the development of spores of *P. cubensis* [37]. Host plants of downy mildew show an increase in transpiration and a decrease in photosynthetic activity [40,41]. With the experimental film, there is a greater total light transmission, which increases photosynthetic activity [12] and can slow down the disease development. In addition, the increase in transpiration due to the initial attack of downy mildew can increase the ambient humidity inside the greenhouse, in turn, favoring the development of downy mildew, which needs high levels of humidity to achieve proper development [37].

As in the case of downy mildew, gummy stem blight needs very high relative humidity (higher than 90%) and mild temperatures for its development [42], so its development was observed at times like downy mildew.

Gummy stem blight needs mild temperatures and high humidity for its development, like downy mildew [43]; perhaps the greater development of the disease with the commercial film is due to indirect effects on the crop and not the direct incidence of light transmission variants, diffusion of light and thermicity, which differentiates the two plastic covers studied. Even so, the effect on the development of the disease was due to the film cover, since it was the only difference between the two greenhouse sectors.

Gummy stem blight causes significant yield losses in cucumber crops that are affected by the disease when they reach infection rates between 15 and 30% [44]. Additionally, gummy stem blight causes many economic losses during the storage of the fruits [29] by producing internal damage to the fruit [30], which sometimes goes unnoticed during harvesting but shows up over time during storage or transport of the fruit. In this trial, no post-harvest damage evaluations were carried out. For the first crop cycle, the percentage of the infection of the gummy stem blight did not exceed 9% and for the second crop cycle the highest percentages of infection occurred after a prolonged period of damage due to downy mildew. So, in this trial, although gummy stem blight caused damage to the crop, it is not the main cause of yield losses.

P. cubensis is possibly the most widespread pathogen that affects cucurbit crops both outdoors and in greenhouses worldwide and causes significant losses in crop production [45]. In this trial, in the first growing cycle, 20% infection was reached, while in the second, the disease reached levels of over 45%. In this trial, 20% infection was reached in the first growing cycle, while in the second growing cycle, the disease reached levels above 45%. The higher incidence of this disease with commercial film cover could be the cause of the lower crop yields. In the first cycle, no statistical differences were obtained in all the evaluations, possibly due to it being the lowest level reached by the disease, but numerical differences were observed when there were no statistical differences. So, a trend similar to that seen in the second cycle was observed, in which there were statistical differences in most of the evaluations, which reinforced the hypothesis that under the experimental film, downy mildew had more difficulty developing than in the commercial film.

The pathogen *S. fuliginea* attacks a wide range of plants [46], but it is especially dangerous in cucurbits because the fast development on the host makes it difficult to prevent crop damages [47]. In our case, for the two crop cycles, powdery mildew appeared in the final moments of the cycle and showed fast development on the crop, reaching infection levels above 30% in a few days. The appearance of this disease led to the end of the crop, with the last harvests having unprofitable production values.

5. Conclusions

From the results obtained in this work, comparing the experimental film E_F with a commercial film C_F, the following conclusions can be drawn:

- The higher PAR radiation transmissivity of the experimental film reduced the incidence of the three fungal diseases studied (powdery mildew, downy mildew and gummy stem blight) in the second crop cycle and of powdery mildew in the first crop cycle, with statistically significant differences.
- Powdery mildew was the disease most affected by the lower radiation transmissivity of the commercial cover film in both crop cycles. The fast development of powdery mildew caused the end of the crop.
- The marketable yield of the cucumber crop was higher with the experimental film E_F (with an increase of 4.9% in the first crop cycle and 14.7% in the second one).
- No statistically significant differences were observed in any of the fruit quality parameters (weight, fruit diameter, length and soluble solids content).

Author Contributions: Conceptualization, F.D.M.-A., A.I.-M., A.P.-F., F.B. and D.I.V.-M.; methodology, F.D.M.-A., A.L.-M. and E.Á.-S.; data analysis, E.Á.-S., M.Á.M.-T., A.L.-M. and A.P.-F.; writing—original draft preparation, E.Á.-S. and M.Á.M.-T.; review and editing, A.L.-M. and F.B.; project administration, D.I.V.-M.; funding acquisition, F.D.M.-A. and D.I.V.-M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by POLITIV EUROPA S.L.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors wish to express their gratitude to Politiv Europa S.L., the Research Centre CIAIMBITAL and Ministry of Universities for the Requalification Aid granted (Margarita Salas). They would like to thank the University of Almeria—ANECCOOP Foundation for their collaboration and assistance during the development of this study.

Conflicts of Interest: The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

References

1. Castilla, N.; Montero, J.I. Environmental control and crop production in Mediterranean greenhouses. *Acta Hort.* **2008**, *797*, 25–36. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.797.1>.
2. Papadakis, G.; Briassoulis, D.; Mugnozsa, G.S.; Vox, G.; Feuilloley, P.; Stoffers, J.A. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. *J. Agric. Eng. Res.* **2000**, *77*, 7–38. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0525>.

3. Von Elsner, B.; Briassoulis, D.; Waaijenberg, D.; Mistriotis, A.; von Zabeltitz, C.; Graud, J.; Russo, G.; Suay-Cortes, R. Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements. *J. Agric. Eng. Res.* **2000**, *75*, 1–16. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0502>.
4. Hemming, S.; Mohammadkhani, V.; Van Ruijven, J. Material technology of diffuse greenhouse covering materials influence on light transmission, light scattering and light spectrum. *Acta Hort.* **2014**, *1037*, 883–895. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.118>.
5. Li, T.; Yang, Q. Advantages of diffuse light for horticultural production and perspectives for further research. *Front. Plant Sci.* **2015**, *6*, 704. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00704>.
6. Hao, X.; Zheng, J.M.; Zhang, Y.; Little, C.; Khosla, S. Effects of Diffused Plastic Cover Materials on Greenhouse Microclimate, Plant Growth, Fruit Yield and Quality, and Energy Use in Greenhouse Fruit Vegetable Production. *Acta Hort.* **2017**, *1182*, 73–78. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1182.8>.
7. Li, T.; Heuvelink, E.; Dueck, T.A.; Janse, J.; Gort, G.; Marcelis, L.F.M. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: Quantifying the contributing factors. *Ann. Bot.* **2014**, *114*, 145–156. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu071>.
8. Brodersen, C.R.; Vogelmann, T.C.; Williams, W.E.; Gorton, H.L. A new paradigm in leaf-level photosynthesis: Direct and diffuse lights are not equal. *Plant. Cell Environ.* **2008**, *31*, 159–164. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01751.x>.
9. Brodersen, C.R.; Vogelmann, T.C. Do Epidermal Lens Cells Facilitate the Absorptance of Diffuse Light? *Am. J. Bot.* **2007**, *94*, 1061–1066. <https://doi.org/10.3732/ajb.94.7.1061>.
10. Hemming, S.; Dueck, T.; Janse, J.; Van Noort, F. The effect of diffuse light on crops. *Acta Hort.* **2008**, *801*, 1293–1300. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.158>.
11. Li, T.; Heuvelink, E.; van Noort, F.; Kromdijk, J.; Marcelis, L.F.M. Responses of two Anthurium cultivars to high daily integrals of diffuse light. *Sci. Hort.* **2014**, *179*, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.039>.
12. Moreno-Teruel, M.Á.; Molina-Aiz, F.D.; Peña-Fernández, A.; López-Martínez, A.; Valera-Martínez, D.I. The Effect of Diffuse Film Covers on Microclimate and Growth and Production of Tomato (*Solanum lycopersicum L.*) in a Mediterranean Greenhouse. *Agronomy* **2021**, *11*, 860. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050860>.
13. Dueck, T.; Janse, J.; Li, T.; Kempkes, F.; Eveleens, B. Influence of diffuse glass on the growth and production of tomato. *Acta Hort.* **2012**, *956*, 75–82. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.6>.
14. Jarquín-Enríquez, L.; Mercado-Silva, E.M.; Maldonado, J.L.; López-Baltazar, J. Lycopene content and color index of tomatoes are affected by the greenhouse cover. *Sci. Hort.* **2013**, *155*, 43–48, ISSN 0304-4238. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.03.004>.
15. Hernández, J.; Bonachela, S.; Granados, M.R.; López, J.C.; Magán, J.J.; Montero, J.I. Microclimate and Agronomical Effects of Internal Impermeable Screens in an Unheated Mediterranean Greenhouse. *Biosyst. Eng.* **2017**, *163*, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.012>.
16. Baptista, F.J.F. *Modelling the Climate in Unheated Tomato Greenhouses and Predicting Botrytis Cinerea Infection*; Ph.D. Thesis, Universidade de Evora: Evora, Portugal, 2007.
17. Raviv, M.; Reuveni, R. Fungal photomorphogenesis: A basis for the control of foliar diseases using photoselective covering materials for greenhouses. *HortScience* **1998**, *33*, 925–929. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2004.tb00388.x>.
18. Xu, L.L.; Li, F.; Xie, H.Y.; Liu, X.Z. A novel method for promoting conidial production by a nematophagous fungus, *Pochonia chlamydosporia AS6.8*. *World J. Micro. Biotechnol.* **2009**, *25*, 1989–1994. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0099-y>.
19. Suthaparan, A.; Solhaug, K.A.; Bjugstad, N.; Gislerød, H.R.; Gadoury, D.M.; Stensvand, A. Suppression of powdery Mildews by UV-B: Application Frequency and Timing, Dose, Reflectance, and Automation. *Plant Dis.* **2016**, *100*, 1643–1650. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-15-1440-RE>.
20. Su, Y.Y.; Qi, Y.L.; Cai, L. Induction of sporulation in plant pathogenic fungi. *Mycology* **2012**, *3*, 195–200. <https://doi.org/10.1080/21501203.2012.719042>.
21. Fernández-Ortuño, D.; Torés, J.A.; De Vicente, A.; Pérez-García, A. Field resistance to QoI fungicides in *Podosphaera fusca* is not supported by typical mutations in the mitochondrial cytochrome b gene. *Pest Manag. Sci.* **2008**, *64*, 694–702. <https://doi.org/10.1002/ps.1544>.
22. Pérez-García, A.; Romero, D.; Fernández-Ortuño, D.; López-Ruiz, F.; de Vicente, A.; Torés, J.A. The powdery mildew Fungus *Podosphaera Fusca* (synonym *Podosphaera Xanthii*), a Constant Threat to Cucurbits. *Mol. Plant Pathol.* **2009**, *10*, 153–160. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00527.x>.
23. Iebeda, A.; Krístková, E.; Sedláková, B.; McCreight, J.D.; Coffey, M.D. Cucurbit powdery mildews: Methodology for objective determination and denomination of races. *Eur. J. Plant Pathol.* **2016**, *144*, 399–410. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0776-7>.
24. Ojiambo, P.S.; Gent, D.H.; Quesada-Ocampo, L.M.; Hausbeck, M.K.; Holmes, G.J. Epidemiology and population biology of *Pseudoperonospora cubensis*: A model system for management of downy mildews. *Annu. Rev. Phytopathol.* **2015**, *53*, 223–246. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120048>.
25. Savory, E.A.; Granke, L.L.; Quesada-Ocampo, L.M.; Varbanova, M.; Hausbeck, M.K.; Day, B. The cucurbit downy mildew pathogen *Pseudoperonospora cubensis*. *Mol. Plant Pathol.* **2011**, *12*, 217–226. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00670.x>.
26. Keinath, A.P.; Holmes, G.J.; Everts, K.L.; Egel, D.S.; Langston, D.B. Evaluation of combinations of chlorothalonil with azoxystrobin, harpin, and disease forecasting for control of downy mildew and gummy stem blight on melon. *Crop Prot.* **2007**, *26*, 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.04.004>.

3. Influencia de la difusividad y transmitancia de un plástico de cubierta de invernadero sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en un cultivo de pepino

27. Yao, X.; Li, P.; Xu, J.; Zhang, M.; Ren, R.; Liu, G.; Yang, X. Rapid and Sensitive Detection of *Didymella bryoniae* by Visual Loop-Mediated Isothermal Amplification Assay. *Front. Microbiol.* **2016**, *7*, 1372. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01372>.
28. Zhang, J.; Bruton, B.D.; Biles, C.L. Cell wall-degrading enzymes of *Didymella bryoniae* in relation to fungal growth and virulence in cantaloupe fruit. *Eur. J. Plant Pathol.* **2014**, *139*, 749–761. <https://doi.org/10.1007/s10658-014-0429-2>.
29. Gusmini, G.; Song, R.; Wehner, T.C. Inheritance of resistance to gummy stem blight in watermelon. *HortScience* **2017**, *52*, 1477–1482. <https://doi.org/10.1093/jhered/esj023>.
30. Hassan, M.Z.; Rahim, M.A.; Natarajan, S.; Robin, A.H.K.; Kim, H.T.; Park, J.I.; Nou, I.S. Gummy stem blight resistance in melon: Inheritance pattern and development of molecular markers. *Int. J. Mol. Sci.* **2018**, *19*, 2914. <https://doi.org/10.3390/ijms19102914>.
31. UNE-EN 13206: 2017+A1 Plastics. Thermoplastic Covering Films for Use in Agriculture and Horticulture; Asociación Española de Normalización (UNE): Madrid, Spain; 6p. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0064784> (accessed on 16 December 2020).
32. ASTM D 1003-13; Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics; American Society for Testing and Materials (ASTM): West Conshohocken, PA, USA; 64p. Available online: <https://www.astm.org/Standards/D1003.htm> (accessed on 8 December 2020).
33. Valera, D.L.; Belmonte, L.J.; Molina-Aiz, F.D.; López, A. Greenhouse Agriculture in Almería. A Comprehensive Techno-Economic Analysis; Cajamar, Caja Rural, Almería, Spain, 2016; 408 p. Available online: <https://publicacionescajamar.es/seriestematicas/economia/greenhouse-agriculture-in-almeria-a-comprehensive-techno-economic-analysis> (accessed on 11 September 2022).
34. Parvatha Reddy, P. *Sustainable Crop Protection Under Protected Cultivation*, 1st ed.; Springer: Singapore, 2016; pp. 434. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-952-3>.
35. Statgraphics® Statgraphics 19. User Manual. Statgraphics Technologies. Available online: [Statgraphics_Centurio_19_User_Guide \(1\).pdf](#) (accessed on 19 September 2022).
36. Cohen, Y. The combined effects of temperature, leaf wetness and inoculum concentration on infection of cucumbers with *Pseudoperonospora cubensis*. *Can. J. Bot.* **1977**, *55*, 1478–1487. <https://doi.org/10.1139/b77-174>.
37. Shetty, N.V.; Wehner, T.C.; Thomas, C.E.; Doruchowski, R.W.; Shetty, V.K.P. Evidence for downy mildew races in cucumber tested in Asia, Europe and North America. *Sci. Hortic.* **2002**, *94*, 231–239. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00013-4).
38. Pharis, V.L.; Kemp, T.R.; Knavel, D.E. Host plant-emitted volatiles as a factor in susceptibility in vitro of Cucumis and Cucurbita spp. to the fungus *Mycosphaerella melonis*. *Sci. Hortic.* **1982**, *17*, 311–317. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(82\)90111-X](https://doi.org/10.1016/0304-4238(82)90111-X).
39. Schuerger A.C.; Brown, C.S. Spectral quality affects disease development of three pathogens on hydroponically grown plants. *HortScience* **1997**, *32*, 96–100.
40. Ingram, D.S. *Physiology and Biochemistry of Host-Parasite Interaction*; Spencer, D.M., Ed.; The Downy Mildews. Academic Press: London, UK, 1981; pp.143–163.
41. Oerke, E.C.; Steiner, U.; Dehne, H.W.; Lindenthal, M. Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions. *J. Exp. Bot.* **2006**, *57*, 2121–2132. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj170>.
42. Virtuoso, M.C.S.; Valente, T.S.; Costa-Silva, E.H.; Trevisan Braz, L.; de Cassia-Panizzi, R.; Forlan-Vargas, P. Implications of the inoculation method and environment in the selection of melon genotypes resistant to *Didymella bryoniae*. *Sci. Hortic.* **2022**, *300*, 111066. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111066>.
43. Bhat, Z.A.; Bhat, M.A.; Ahangar, Z.A.; Badri, G.; Mir, H.; Mohi-u-Din, F. Survival of *Didymella bryoniae* incitant of ridge gourd blight under temperate conditions. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* **2018**, *7*, 2632–2638. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.705.305>.
44. Liu, S.; Shi, Y.; Miao, H.; Wang, M.; Li, B.; Gu, X.; Zhang, S. Genetic analysis and QTL mapping of resistance to gummy stem blight in *Cucumis sativus* seedling stage. *Plant Dis.* **2017**, *101*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2017.01.023>.
45. Lebeda, A.; Cohen, Y. Cucurbit downy mildew (*Pseudoperonospora cubensis*) biology, ecology, epidemiology, host-pathogen interaction and control. *Eur. J. Plant Pathol.* **2011**, *129*, 157–192. <https://doi.org/10.1007/s10658-010-9658-1>.
46. He, X.; Li, Y.; Pandey, S.; Yandell, B.S.; Pathak, M.; Weng, Y. QTL mapping of powdery mildew resistance in WI 2757 cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Theor. Appl. Genet.* **2013**, *126*, 2149–2161. <https://doi.org/10.1007/s00122-013-2125-6>.
47. Olczak-Woltman, H.; Marcinkowska, J.; Niemirowicz-Szczytt, K. The genetic basis of resistance to downy mildew in *Cucumis* spp. latest developments and prospects. *J. Appl. Genet.* **2011**, *52*, 249–55. <https://doi.org/10.1007/s13353-011-0030-8>.

4. Efecto de las cubiertas plásticas en el desarrollo de enfermedades fúngicas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y pimiento (*Capsicum annuum* L.) en invernaderos Mediterráneos

Resumen

La mayoría de los invernaderos mediterráneos están cubiertos por materiales plásticos. La influencia sobre la luz que presentan estos materiales afecta directamente al desarrollo de los cultivos modificando las condiciones climáticas en los invernaderos. El objetivo de este estudio fue analizar el efecto del uso de dos cubiertas plásticas en un invernadero experimental, sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en dos ciclos de cultivos de primavera-verano: uno en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de febrero a julio de 2021 y otro en pimiento (*Capsicum annuum* L.) de febrero a julio de 2022. El estudio se llevó a cabo en Almería (España) en un invernadero multitúnel dividido, transversalmente en dos sectores, por una lámina de polietileno. Se instaló una cubierta plástica comercial en el sector este (90% de transmisividad y 55% de difusividad) y otra cubierta plástica experimental en el sector oeste (85% de transmisividad y 60% de difusividad). Además, se estudió el efecto de estas cubiertas plásticas sobre el rendimiento y la calidad de la cosecha. En este estudio se establecieron de forma natural dos enfermedades sobre el cultivo: (i) oídio (*Leveillula taurica*), tanto en el ciclo de cultivo de tomate como de pimiento y (ii) tizón temprano (*Alternaria solani*) en el tomate. Los análisis de ambas enfermedades mostraron que las áreas del invernadero cubiertas con los plásticos, que presentaban una menor transmisividad de la luz solar, mostraron niveles más altos de enfermedad que las áreas que usaron la cubierta plástica que permitía una mayor transmisividad de luz dentro del invernadero, diferenciándose estadísticamente en algunas fases del cultivo. El rendimiento comercial fue un 4,2% (para tomate) y un 3,1% (para pimiento) superior en el sector con el film experimental con alta transmisividad. Para ambos cultivos, la calidad de los frutos no presentó diferencias estadísticamente significativas entre las dos zonas de estudio.

Palabras clave: invernadero, cubierta plástica, cultivo protegido, infección fúngica.

Article

Effect of Greenhouse Film Cover on the Development of Fungal Diseases on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Pepper (*Capsicum annuum* L.) in a Mediterranean Protected Crop

Eugenio Ávalos-Sánchez ¹, María Ángeles Moreno-Teruel ^{1,2}, Alejandro López-Martínez ^{1,*}, Francisco Domingo Molina-Aiz ¹, Fátima Baptista ², Patricia Marín-Membrive ¹ and Diego Luis Valera-Martínez ¹

¹ Research Centre CIAIMBITAL, University of Almería, Ctra. de Sacramento s/n, 04120 Almería, Spain

² Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, MED—Instituto Mediterrâneo para a Agricultura, Ambiente e Desenvolvimento, Universidade de Évora, 7000-849 Évora, Portugal

* Correspondence: alexlopez@ual.es

Abstract: Greenhouses on the Mediterranean coast mainly use plastic materials as their cover. The influence of light exerted by these materials directly affects the crops by modifying the environment in which they develop. The aim of this study was to analyze the effect of the use of two plastic films in an experimental greenhouse on the development of fungal diseases in two spring–summer crop cycles: tomato (*Solanum lycopersicum* L.) from February to July 2021 and pepper (*Capsicum annuum* L.) from February to July 2022. The study was carried out in Almería (Spain) in a multispan greenhouse divided transversely into two sectors by a polyethylene sheet. A commercial film was installed in the east sector (90% of transmissivity and 55% diffusivity) and an experimental film was installed in the west sector (85% of transmissivity and 60% diffusivity). In addition, the effect of the yield and quality of the harvested fruit was determined. In this study, two diseases were established naturally on the crop: (i) powdery mildew (*Leveillula taurica*) in both the tomato and the pepper crop cycles and (ii) early blight (*Alternaria solani*) in the tomato. The analyses of both diseases showed that the areas of the greenhouse that used the plastic cover, which presented a lower sunlight transmissivity, showed higher levels of disease than the areas that used the plastic cover that allowed greater transmissivity of light within the greenhouse, differing statistically in some phases of the crop. The marketable yield was 4.2% (for tomato) and 3.1% (for pepper) higher in the sector with the experimental film with high transmissivity. For both crops, the quality of the fruits did not show statistically significant differences.

Keywords: greenhouse; cover film; protected cultivation; fungal infection



Citation: Ávalos-Sánchez, E.; Moreno-Teruel, M.Á.; López-Martínez, A.; Molina-Aiz, F.D.; Baptista, F.; Marín-Membrive, P.; Valera-Martínez, D.L. Effect of Greenhouse Film Cover on the Development of Fungal Diseases on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Pepper (*Capsicum annuum* L.) in a Mediterranean Protected Crop. *Agronomy* **2023**, *13*, 526. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020526>

Academic Editor: Mukesh Dubey

Received: 26 December 2022

Revised: 7 February 2023

Accepted: 10 February 2023

Published: 11 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Almería is the Mediterranean region with the highest concentration of greenhouses in Europe and in the world, with a greenhouse land surface of 32,827 ha in 2021 [1]. Mediterranean greenhouses are mainly composed of tensile steel cable structures supported by columns and covered with transparent plastic roofs [2]. These greenhouses protect crops from external environmental conditions using mainly passive climate systems without energy inputs [3], making them more sustainable with a lower carbon footprint [4].

Plastic covers can increase the level of diffuse radiation inside greenhouses, reaching diffuse radiation in the shaded areas and providing higher rates of photosynthetic activity in crops [5]. Under cover materials that transform direct light into diffuse light, the light profiles are more homogeneous and can increase yield [6–8] of tomato (9%) [9] and cucumber (*Cucumis sativus* L.) (11–15%) [10,11]. The increase of transmissivity to photosynthetically active radiation (PAR) of the greenhouse cover improves photosynthetic activity and consequently can enhance tomato yields [12]. These changes in the light that reaches the crops, and the effect on them, could influence the microclimate inside

the greenhouse and affect the development of certain fungal diseases. The incidence of light in the canopy affects some diseases such as powdery mildew. The quality of light can affect the conidiophore development [13], which can modify the severity of powdery mildew on the crop depending on the PAR, ultraviolet or infrared radiation that reaches the plants [14]. In addition, host plants of some diseases show increased transpiration and decreased photosynthetic activity [15].

Normally, farmers apply phytosanitary products periodically throughout the crop, without regard to the severity of the disease, which leads to excessive applications of phytosanitary products [16]. It is an unsustainable agricultural practice, which causes environmental and health risks; it also contributes to the emergence of disease resistance to phytosanitary products due to their excessive use [17,18]. The European Economic Community has reduced in the last years the active materials allowed for use in the fight against diseases and agricultural pests. In the current regulatory framework, any knowledge or technique allowing reductions of damage to crops generated by agricultural pests acquires significant interest. The reduction of pests by the use of new plastic films does not increase the work of the producers and generates an environmental benefit by reducing the use of pesticides, making the farms more sustainable.

The main fungal disease in tomato and pepper crops developed in the spring–summer cycles in Almería greenhouses is powdery mildew. This endemic disease in the southwest of Spain is one of the biggest concerns for greenhouse growers. It is one of the diseases with the highest expenditure on phytosanitary products at the European level [19] and one of the most widespread worldwide [20]. The climate of the area, characterized by warm temperatures with high humidity (due to the proximity of the sea) and dew at the beginning of the day, favors the development of powdery mildew [21–23]. Additionally, the characteristic winds of the Almería region that reduce the ambient humidity can facilitate the dispersion of the spores [21]. In addition, Mediterranean greenhouses (mostly naturally ventilated without forced ventilation to reduce excess humidity [24]) also benefit the presence of powdery mildew.

Powdery mildew is one of the fungal diseases that most affects the production of tomato and pepper in greenhouses [19] and could cause losses in the final production of the crop between 2–4 kg m⁻² [25]. This disease is the main cause of the increase in the use of pesticides in Europe due to the important damages that are produced in agricultural production [19,26]. *Leveillula Taurica* is the pathogen that causes powdery mildew in tomato and pepper, which in turn is one of the most important fungal diseases in these crops. Powdery mildew in most cases is an epiphytic disease, generating main damages to the outer parts of the leaf. *L. taurica* is an endophytic fungus that penetrates the internal tissues of the leaf (the mesophile), causing internal damage to the leaf and defoliation, which generates production losses in crops [19].

Alternaria solani is also one of the most common pathogens in solanaceous crops, causing early blight on all tomato varieties worldwide that can reduce production [27]. The symptoms of early blight are the appearance of necrotic spots in concentric rings with a yellow chlorotic halo on the leaves, causing the reduction of the photosynthetic area of the plant [28–31]. After colonization, the damage is visible 2–3 days after infection and spores occur between 3 and 5 days later. The pathogen can remain in the greenhouse between different crop cycles, with mycelia on hosts or conidia in the soil, in crop residues and in seeds [32]. This pathogen attacks at all stages of growth and in all plant structures of the tomato, including fruits, leading to crop losses that can reach up to 79% of the yield [33,34].

Tropical climates with elevated temperatures and rainfall favor the development of the pathogen; this requires the use of specific fungicides to control crop damage [35]. Frequent rains, high humidity and high temperatures (24–29 °C) help the development of early blight, but also semi-arid climates with wet nights causing frequent and prolonged night dew favor the proliferation on crops [29].

It is known that there are differences in the development of fungal diseases in different crops, depending on the quality and quantity of light received by the plants [13,14,36–39].

The light in the canopy could be related to the development of diseases that a priori would be more influenced by environmental humidity, as would be the case of early blight. In a previous cucumber crop developed in the same experimental greenhouse, we observed that powdery mildew infection decreased by 30% under the influence of a plastic cover with high transmissivity [11].

The aim of this study was to evaluate the effect of an experimental cover film with high transmittance and high light diffusivity on the development of fungal diseases and yield and fruit quality in tomato and pepper crops developed in the spring–summer cycles in a Mediterranean greenhouse.

2. Materials and Methods

2.1. Characteristics of Experimental Greenhouse

The trials were carried out in a multispan greenhouse located at the UAL-ANECOOP Experimental Station “*Catedrático Eduardo Fernández*” of the University of Almeria (36°51′ N, 2°16′ W and 87 m.a.s.l.). The greenhouse had two isolated sectors separated by a polyethylene sheet (Table 1). The greenhouse had roof and side vent openings (Table 1) protected with insect-proof screens (10 × 20 threads cm⁻²).

Table 1. Characteristics of the two sectors of the experimental greenhouse. S_C—crop surface; S_V—vent opening surface; S_V/S_C—ventilation surface percentage.

Sector	Plastic Cover	Dimensions	S _C (m ²)	S _V (m ²)	S _V /S _C (%)
West	E _F	40 m × 25 m	1000	232.2	23.2
East	C _F	40 m × 20 m	800	193.9	24.2

An experimental diffuse film with high transmissivity (E_F) was installed in the cover of the west sector of the greenhouse, while a commercial diffuse film (C_F) covered the east sector (control sector). Both plastic films were developed by Politiv Europa S.L. (Israel) and their optical properties (Table 2) were determined following the UNE-EN 13206:2017 + A1 [40] and ASTM D 1003-13 [41] standards.

Table 2. Optical properties of the cover films. Transmission of photosynthetically active radiation T_{PAR} (400–700 nm), transmission of ultraviolet light T_{UV} (300–380 nm), diffusion of light D (%) and thermal efficiency T (%).

Plastic Cover	T _{PAR}	T _{UV}	D	T
E _F	0.90	0.24	55	90
C _F	0.85	0.24	60	85

In this trial, the cover was whitewashed in both sectors of the greenhouse. This technique is traditionally used by most Almeria growers to reduce temperatures inside the greenhouse, decreasing crop stress and irrigation needs in the months with the highest incidence of radiation (spring–summer). This technique reflects part of the direct radiation reaching the greenhouses, thus influencing the radiation transmitted through the plastic covers [42]. A whitewashing concentration of 0.25 kg L⁻¹ of calcium carbonate was applied in May 2021 for the tomato crop and 0.5 kg L⁻¹ was applied for the pepper crop in March 2022. The whitewashing of the greenhouse covers degraded over time, detaching from the plastic covers due to weather or climatic conditions [42].

2.2. Crop System

The study was carried out in two spring–summer crop cycles: (i) a tomato crop was transplanted on 7 February 2021 with the commercial variety Ramyle RZ F1 (Rijk Zwaan Ibérica, S.A., Almeria, Spain); (ii) a pepper crop was transplanted on 20 February 2022 with the commercial variety Bemol RZ F1 (Rijk Zwaan Ibérica, S.A., Almeria, Spain).

The plants grew in “arenado”, which is an artificial sand mulched soil, typically used in Almeria greenhouses [43]. The plant density used in the trial was 1.2 plants m^{-2} for tomato and 2 plants m^{-2} for pepper. Fertigation was applied uniformly in both sectors by drip irrigation. Tomato and pepper crop management tasks (such as cleaning, trellising, pruning and harvesting) were carried out at the same time in both sectors.

2.3. Measurement of the Infection Level in Plants

For each experimental sector (west- E_F and east- C_F), four evaluation plots were established: two in the northern zone and two in the southern (with an area of 10 m^2 each in both crops). The plots chosen were away from the edges of the greenhouse to avoid the edge effect (Figure 1).

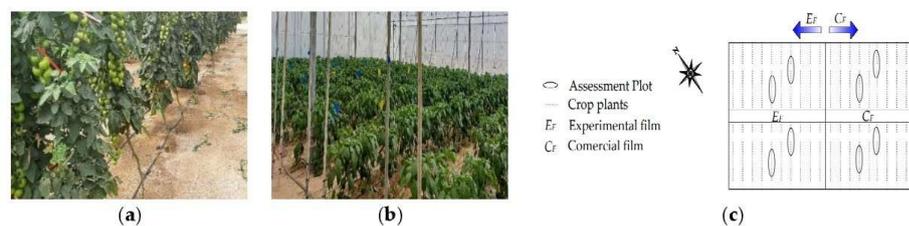


Figure 1. Detail of tomato (a), pepper (b) and distribution of the evaluation plots in each experimental sector (c).

The methodology used to determine the infection rate for each disease was the same that was used by Ávalos et al. [11]. Twelve plants were randomly selected in each evaluation plot for tomato and twenty plants for pepper. The percentage of affected leaf area on the upper and lower side of four leaves of similar characteristics was evaluated for each selected plant. The identification of the pathogens (*L. taurica* and *A. solani*) that cause the diseases was carried out by direct observation in the greenhouse and subsequent microscopic observation of mycelia, spores and conidia [44,45]. The choice of the evaluation plots followed the European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) standards. For powdery mildew diseases, EPPO PP 1/181 (conduct and reporting of efficacy evaluation trials), PP 1/152 (design and analysis of efficacy evaluation trials) and PP 1/57 (powdery mildew on cucurbits and other vegetables) are applicable, as well as EPPO PP 1/263 (*Alternaria solani* and *Alternaria alternata* on potato and tomato), PP 1/135 (phytotoxicity assessment) and pp 1/121 (leaf spot on vegetables, ALTESO). Disease level assessment (powdery mildew and early blight) was carried out weekly from the observation of the first symptoms in both crop cycles.

2.4. Yield and Fruit Quality Measurements

To determine the influence of different plastic films on tomato and pepper yield, four crop lines were selected in each sector (considered as statistical replicates). Marketable yield was weighed at each harvest with a Mettler Toledo electronic balance (Mettler Toledo, S.A.E., L'Hospitalet de Llobregat, Spain; sensitivity of 20 g and maximum capacity 160 of 60 kg).

For the evaluation of fruit quality, we used different parameters depending on the crop. In the case of tomato, ten fruits were randomly selected in each harvest to measure their weight [46] with an electronic balance PB3002-L Delta Range® (Mettler Toledo, SA, L'Hospitalet de Llobregat, Spain), with a measuring range of 0–600 kg and an accuracy of 0.1 g. The equatorial diameter [47] was measured with a digital gauge (Medid Precision, SA, Barcelona, Spain), with a measuring range of 0–150 mm and resolution of 0.010 mm. The soluble solids' content was determined with a PAL1 refractometer (Atago Co. Ltd., Fukuoka, Japan), with a measurement range of 0–53% and an accuracy of 0.2%. The skin

firmness [48] was measured with a digital texture analyzer PCE-FM 200 (PCE- Ibérica SL, Tobarra, Spain), with a range of 0–20 kg and an accuracy of 0.5 g. The dry matter content [46] was determined by drying fruits at 70 °C for 48 h in an oven (23–240 L, FD series, Binder GmbH, Tuttlingen, Germany). Visual quality of fruits [49] was estimated with a CR-400 portable colorimeter (Konica Minolta, Morristown, NJ, USA), with an area of 8 mm for reflected color measurement and six silicon photodiode detectors (three for the measuring beam and three for lighting control). In the case of the pepper, we selected ten random fruits of every sector in each harvest. In addition to the quality parameters measured in tomato fruits, we measured the length and width of pepper fruits and the length of the pedicel with a tape measure and the mesocarp thickness with a digital gauge.

2.5. Statistical Analysis

Statistical analysis of the data was carried out with Statgraphics Centurion v.18 software (Manugistics Inc., Rockville, MD, USA) using analysis of variance (considered significant if the p -value is ≤ 0.05), comparing mean values with Fisher's least significant difference (LSD) procedure. Bartlett's, Cochran's and Hartley's tests were used to determine whether a sector had similar variance. For parameters with different variance, a non-parametric analysis was performed with Friedman's test, where each row represents a block (the date of measurement) using the box-and-whisker plot [50].

3. Results

3.1. Tomato Crop Cycle

The most important disease during the tomato crop cycle was powdery mildew. The disease level was not very high, with an infection rate around 25% (Figure 2). Early blight does not usually appear on the dates but appeared in our trial. The exceptional rains that fell in Almería between May and June favored the appearance of this disease, presumably due to the increased humidity. Early blight reached lower infection levels than powdery mildew but was sufficient for the farmer to carry out an antifungal treatment, mainly due to the damage caused on tomato leaves and fruit (Figure 2).

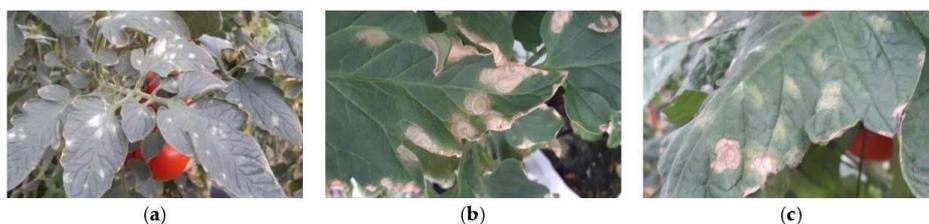


Figure 2. Leaves affected for different disease: powdery mildew in tomato (a), early blight in tomato (b) and powdery mildew and early blight in the same tomato leaf (c).

3.1.1. Powdery Mildew

The evaluation of infection by powdery mildew began on April 21 (appearance of the first symptoms) until July 10, which was the end date of the crop. At the end of the trial, some of the evaluated plots reached infection rates above 20% (Figure 3). Powdery mildew development was faster in the areas covered by the commercial film (C_F), with statistically significant differences even at times with very low infection levels (May 29). Between May 29 and June 19, there was a significant increase in the disease in both sectors. The statistically significant higher levels of infection in the sector with the commercial plastic film were mainly observed in the final phase of the crop, when the incidence of disease increased in the greenhouse (Figure 3).

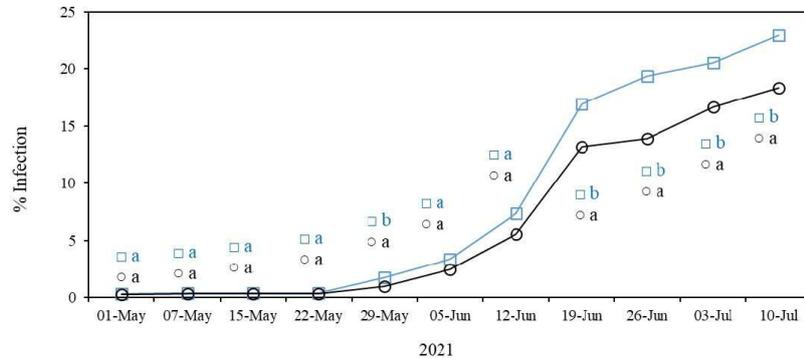


Figure 3. Development of powdery mildew in the tomato: commercial film C_F (□); experimental film E_F (○). Different letters indicate statistically significant differences (p -value ≤ 0.95).

The evolution of the infection rate may be influenced by the transmissivity and diffusivity of the radiation of the experimental cover plastic. The results in the tomato crop agreed with the results obtained in two previous cucumber crops developed in the autumn–winter cycles in the same experimental greenhouse [11].

To reduce excessive inside temperatures at the end of the tomato crop, a cover white-washing was applied with a concentration of 0.25 kg L^{-1} of calcium carbonate in May 2021. Several unusual days of rain (May and June) eliminated the whitewashing of the greenhouse, which was not replaced because of the proximity of the end of the crop. After the rainy days, the disease incidence was higher in both sectors.

3.1.2. Early Blight

Early blight appeared naturally in this trial, with the first symptoms observed from 20 May onwards. A period of elevated temperatures and 8 days of rain (Figure 4), which increased the environmental humidity, favored the development of the disease. Although the trial was carried out in a protected environment (greenhouse), external environmental factors were important for the development of fungal diseases. The accumulated rainfall recorded during the trial was 50 mm, in an area where the average annual rainfall is less than 250 mm.

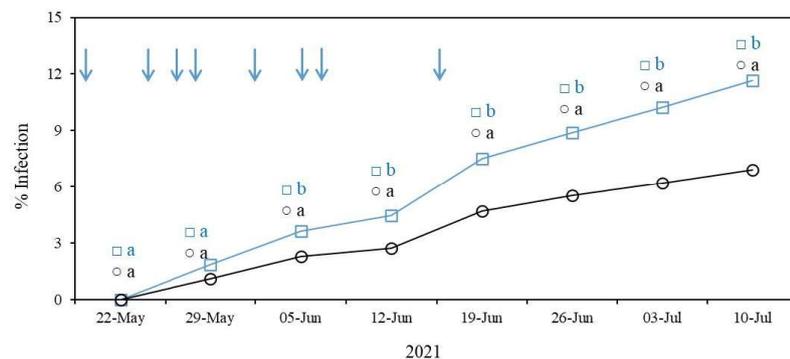


Figure 4. Development of early blight in the tomato: commercial film C_F (□); experimental film E_F (○). Different letters indicate statistically significant differences (p -value ≤ 0.95). Arrows indicate rainy days.

4. Efecto de las cubiertas plásticas en el desarrollo de enfermedades fúngicas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y pimiento (*Capsicum annuum* L.) en invernaderos Mediterráneos

The level of disease reached was not extraordinarily high and the development was progressive and without notable periods of severity. The early blight infection rate was always higher in the areas covered with the commercial film, with statistically significant differences from the onset of the disease (Figure 4).

3.1.3. Fruit Quality

The statistical analysis of the fruit quality parameters did not show statistically significant differences between the two sectors. The greatest differences were observed in fruit weight and firmness, both greater in the sector with the commercial film (Table 3). The soluble solids' content and equatorial diameter of the fruit were slightly higher in the sector with the commercial film. The dry matter content was the same between the fruit harvested in the two sectors (Table 3).

Table 3. Average values of the production quality parameters for the tomato: weight—WF (g); equatorial diameter—DF (mm); firmness—FF (kg cm⁻²); soluble solids content—SSC (°Brix); dry matter—DM (%).

Film	WF	DF	FF	SSC	DM
E _F	130.1 ^a ± 21.6	65.3 ^a ± 4.2	1.6 ^a ± 0.7	4.4 ^a ± 0.3	6.6 ^a ± 0.9
C _F	133.3 ^a ± 14.1	65.9 ^a ± 4.8	2.1 ^a ± 4.4	4.6 ^a ± 0.5	6.6 ^a ± 0.9

Values with different letters in the same column show statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (*p*-value ≤ 0.05).

Fruit color did not show statistically significant differences between the commercial film and the experimental film. The luminosity (L) and the yellow/blue color component (b) were higher in the fruit harvested in the sector with the experimental film. The red/green color component (a) was slightly higher in the sector with the commercial film (Table 4).

Table 4. Average values of the color characteristics measured in tomato fruits. Colorimetric coordinates corresponding to the luminosity (L), the red/green color component (a), the yellow/blue color component (b) and the chromaticity (a/b).

Film	L	a	b	a/b
E _F	39.4 ^a ± 3.3	23.1 ^a ± 2.9	25.2 ^a ± 4.4	0.9 ^a ± 0.2
C _F	39.0 ^a ± 3.3	23.3 ^a ± 3.0	25.1 ^a ± 4.6	0.9 ^a ± 0.2

Values with different letters in the same column show statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (*p*-value ≤ 0.05).

Chromaticity (a/b) is a parameter proportional to fruit maturity associated with visual quality, which translates into better commercial quality. This parameter was similar between the two experimental sectors.

3.1.4. Tomato Production

The results for the tomato show an increase in marketable yield of 0.21 kg/m² in the sector of the greenhouse with the experimental film E_F (Figure 5), with an increase of 4.2% compared with the commercial film. Additionally, the total cumulative yield was higher with E_F (6.52 kg/m²) in comparison with C_F (6.38 kg/m²) (Figure 5). With E_F, the total yield was 2.2% higher than with C_F.

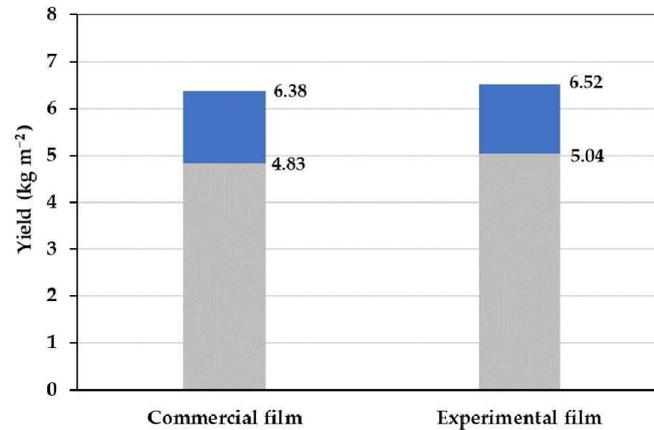


Figure 5. Marketable (■) and total yield (■) of the tomato with commercial film (C_F) and experimental film (E_F).

3.2. Pepper Crop Cycle

In the second crop cycle (February–June 2022), powdery mildew also affected the pepper. The first symptoms of the disease were observed in April 2022, with a low incidence. Therefore, the evaluations started in May when powdery mildew spots could be observed in almost all the evaluation plots. Figure 6 shows the damage caused by the high incidence of the disease in peppers and even the defoliation present in some plants.

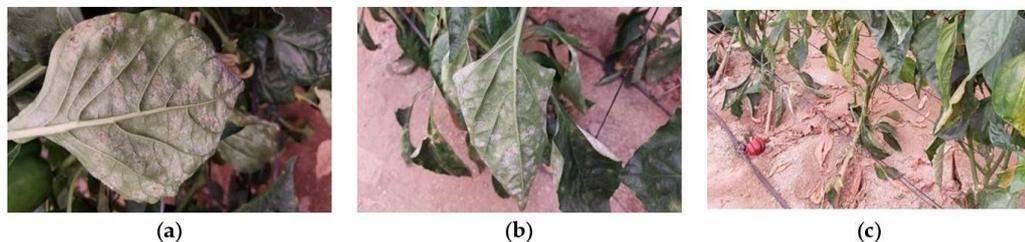


Figure 6. Leaves affected for powdery mildew (a,b) and defoliation leaves in pepper (c).

3.2.1. Powdery Mildew

In the pepper, at the beginning of the crop cycle, no differences were observed between the evaluation plots. Statistically significant differences only appeared in the last three evaluations. Previously, even with infection percentage levels superior to 10 percent, no difference was observed between the evaluation plots (Figure 7).

In this case, a whitening dose of 0.5 kg L⁻¹ of calcium carbonate was used in March 2022, because pepper is more sensitive to elevated temperatures at the beginning of the crop. There were no significant rains during crop development, so the whitening remained on the canopy until deterioration, as described by López-Martínez et al. [42]. At the beginning of the crop cycle, there were no clear differences in the development of the disease between the two sectors. However, with the deterioration of the whitening, we observed how the differences in the development of the disease manifested (Figure 7), as happened in the tomato.

4. Efecto de las cubiertas plásticas en el desarrollo de enfermedades fúngicas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y pimiento (*Capsicum annuum* L.) en invernaderos Mediterráneos

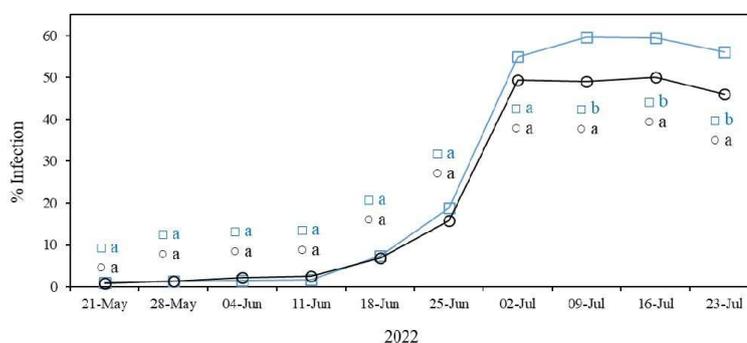


Figure 7. Development of powdery mildew in the pepper: commercial film C_F (□); experimental film E_F (○). Different letters indicate statistically significant differences (p -value ≤ 0.95).

The development of powdery mildew at the beginning of the pepper crop cycle was very low. In the last phase of the crop cycle (18 June–2 July 2022), an aggressive development of the disease caused severe damage to the crop that drastically reduced the yield, producing as a consequence the premature end of the crop. In this period, environmental conditions inside the greenhouse were very favorable for the development of the disease, because the leaf area of pepper affected by powdery mildew increased fivefold (Figure 7).

3.2.2. Fruit Quality

No statistically significant differences were observed for any of the pepper quality parameters studied. The size and weight of pepper fruits were higher in the sector with the experimental film. However, the pedicel length and the dry matter were higher in the sector with the commercial film (Table 5).

Table 5. Average values of the production quality parameters for the pepper: weight—WF (g); fruit length—LF (mm); fruit width—WiF (mm); mesocarp thickness—MT (mm); pedicel length—PL (mm); firmness—FF (kg cm⁻²); soluble solids content—SSC (°Brix); dry matter—DM (%).

Film	WF	LF	WiF	MT	PL	FF	SSC	DM
E _F	259.2 ^a ± 46.7	87.5 ^a ± 10.9	93.1 ^a ± 5.7	7.1 ^a ± 1.1	46.44 ^a ± 12.6	2.5 ^a ± 0.4	7.7 ^a ± 0.7	9.6 ^a ± 1.6
C _F	252.6 ^a ± 44.8	87.4 ^a ± 12.2	91.9 ^a ± 6.7	7.1 ^a ± 1.0	50.0 ^a ± 14.4	2.5 ^a ± 0.5	7.8 ^a ± 0.7	9.9 ^a ± 1.5

Values with different letters in the same column show statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (p -value ≤ 0.05).

The pepper color did not show statistically significant differences between the sectors studied. All the parameters that quantify it—luminosity (L) and the yellow/blue (b) and red/green (a) color component—were higher in the sector with the experimental film (Table 6). Chromaticity (a/b) was similar in the two sectors.

Table 6. Average values of the color characteristics measured in pepper fruits. Colorimetric coordinates corresponding to the luminosity (L), the red/green color component (a), the yellow/blue color component (b) and the chromaticity (a/b).

Film	L	a	b	a/b
E _F	35.1 ^a ± 1.9	27.1 ^a ± 3.5	15.9 ^a ± 2.7	1.7 ^a ± 0.2
C _F	35.0 ^a ± 2.1	26.9 ^a ± 4.0	15.8 ^a ± 2.8	1.7 ^a ± 0.2

Values with different letters in the same column show statistically significant differences with a confidence level of 95.0% (p -value ≤ 0.05).

3.2.3. Pepper Production

The marketable production of the pepper was similar in the two sectors. As with the tomato, it was slightly higher in the sector with the experimental film, in this case by 3.1% (0.06 kg/m²) compared with the sector with the commercial film.

4. Discussion

For tomato and pepper crops developed in the spring–summer cycles, a greater development of some fungal diseases was generally observed in the greenhouse sector with the commercial film; it could be related to the higher light transmissivity of the experimental film (90%) compared with the commercial film (85%). Powdery mildew survives and grows well in shady conditions; the conidia are sensitive to direct sunlight and ultraviolet radiation [51–54]. However, the whitewashing effect results in lower temperatures and higher relative humidity due to the lower incidence of radiation, which also influences the development of pathogenic fungi.

The quantity of light reaching the plant leaves can influence the development of powdery mildew [55], as we can see in Figures 3 and 7. The areas covered with the plastic that allowed a lower total light transmission showed a higher development of the disease, which could be related to a lower incidence of ultraviolet radiation (UV-B, 280–300 nm) that inhibits the development of powdery mildew in the tomato [54]. The differences in the disease development under different plastics may be because of different light qualities under different plastic films or an indirect effect on host plant susceptibility [14,56]. Light intensity and light quality can affect the pathogen or host plant in powdery mildew infections, as has been shown with *L. taurica* on pepper [57] and powdery mildew on cucumber [58].

The cover whitewashing also influenced the light transmitted through the films tested in this work. In the tomato cycle, the whitewashing did not have a significant effect on the results because the rains removed it from the greenhouse canopy (Figure 4). In this case, we observed the different incidences of diseases from the beginning of the crop. In the pepper cycle, there was practically no rain, so the whitewashing remained on the roof of the greenhouse until it deteriorated. Therefore, even with infection rates of 20%, the two areas covered with different films did not differ in disease level. In July, with the whitewashing severely degraded, we observed statistically significant differences. The different levels of disease in both sectors clearly showed the importance of the light that reaches the crop for the development of powdery mildew.

In the tomato cycle, early blight development was also observed. In this case, there was also a lower level of disease in the greenhouse sector covered with the experimental plastic (Figure 4). Early blight development is known to be strongly affected by the need for high humidity and elevated temperatures [35]. Rainfall during the trial could benefit the development of early blight in the crop.

Different wavelengths of light affecting crops can influence the development of diseases as well as the host plant, which can make it more susceptible to these diseases [59]. Early blight needs elevated temperatures and high humidity values for its correct development [35], so the effect of light reaching the crop acts indirectly on the development of the disease [60]. Under the experimental film, there is a greater transmission of total light, which increases photosynthetic activity [12] and may retard the development of the disease. In addition, other studies show that low light in tomato plants reduces the production of antioxidants and hydrogen peroxide and increases the presence of malondialdehyde [61], reducing the plants' natural defenses against pathogens.

The analysis of the marketable yield of the tomato showed an increase of 0.25 kg m⁻² in the western sector of the greenhouse with the experimental film (Figure 5). This 4.2% increase in marketable yield could be due to the higher radiation transmissivity of the experimental film. For cucumber crops, the yield increased by 14% [11], 10% [9] and 4.8% [7] with diffuse film covers. Similarly, Dueck et al. [10] found an increase in tomato yield of 4.8%. Fruit quality showed no statistically significant differences (Tables 4 and 5)

in any of the parameters analyzed. In the tomato crops, sugar contents associated with fruit flavor and pigments associated with fruit maturity can be influenced by the cover materials [62,63]. Plastic covers increase the level of diffuse radiation inside greenhouses, providing higher rates of photosynthetic activity in crops since this diffuse radiation reaches areas that are shaded in outdoor crops [5].

The increase of 0.06 kg/m^2 in the yield of marketable fruits obtained in the sector with the experimental film with respect to the commercial film for the pepper crop (Figure 8) could be also attributed to the higher light transmissivity of the cover. Hee et al. [64] obtained a higher productivity of peppers in a greenhouse with a plastic cover with a high light diffusion rate with respect to a polyethylene plastic cover. The production increased by 3.1%, values similar to those studied by Hemming et al. [65], which were found to increase by 5–6% during the summer months due to the use of a diffuse cover film. There were no statistically significant differences in any of the cases studied (Tables 5 and 6) in the quality parameters of the pepper fruit studied, although they were higher in the sector with the experimental film. Other authors did detect differences in dry matter content, with higher values in the sectors with the higher diffuse radiation film [64].

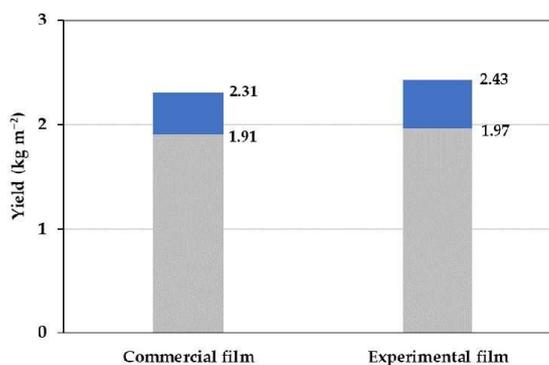


Figure 8. Marketable (■) and total yield (■) of the pepper with commercial film (C_F) and experimental film (E_F).

5. Conclusions

From the results obtained in this work, in which a commercial film (C_F) was compared with an experimental film (E_F), the following conclusions can be drawn:

- In comparison with the commercial film, the experimental film (E_F)—with a 5% higher light transmissivity—reduced the incidence of powdery mildew in the tomato and the pepper mainly in the final phase of both crop cycles, with statistically significant differences.
- In comparison with the commercial film, the experimental film (E_F) reduced the incidence of early blight in the tomato, with statistically significant differences.
- The marketable yield of the tomato and the pepper was higher with the experimental film (E_F) in comparison with the commercial film, with an increase of 4.2% for the tomato and 3.1% for the pepper. However, no statistically significant differences were observed in any of the fruit quality parameters (weight, equatorial diameter, fruit length and width, stalk length, wall thickness, firmness, soluble solids' content, dry matter and colorimetric parameters).

In the future we recommend studying the effect of the plastic cover with different optic properties combined with passive climate control systems (low energy consumption) to improve productivity and the sustainability of the greenhouses.

Author Contributions: Conceptualization, F.D.M.-A., A.L.-M., F.B. and D.L.V.-M.; methodology, F.D.M.-A., A.L.-M. and E.Á.-S.; data analysis, E.Á.-S., M.Á.M.-T., P.M.-M. and A.L.-M.; writing—original draft preparation, E.Á.-S. and M.Á.M.-T.; review and editing, A.L.-M. and F.B.; project administration, D.L.V.-M.; funding acquisition, F.D.M.-A. and D.L.V.-M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by POLITIV EUROPA S.L. and by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness by the National R+D+i Plan Project PID2019-111293RB-I00.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors wish to express their gratitude to Politiv Europa S.L., the Research Centre CIAIMBITAL and Ministry of Universities for the Requalification Aid granted (Margarita Salas). They would like to thank the University of Almería—ANECCOOP Foundation for their collaboration and assistance during the development of this study.

Conflicts of Interest: The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

References

1. CAGPDS. *Cartography of Greenhouses in Almería, Granada and Málaga*; Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible (CAGPDS): Sevilla, Spain; Junta de Andalucía: Sevilla, Spain; Secretaría General de Agricultura, Ganadería y Alimentación: Sevilla, Spain, 2021; p. 26. Available online: https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/2021-11/Cartografia%20inv_AL_GR_MA_v210928%20_1.pdf (accessed on 1 January 2022). (In Spanish)
2. Peña, A.; Peralta, M.; Marín, P. Design and testing of a structural monitoring system in an Almería-type tensioned structure greenhouse. *Sensors* **2020**, *20*, 258. [CrossRef] [PubMed]
3. Ouazzani Chahidi, L.; Fossa, M.; Priarone, A.; Mechaqrane, A. Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate—A case study. *Appl. Energy* **2021**, *282*, 116156. [CrossRef]
4. Pérez-Neira, D.; Soler-Montiel, M.; Delgado-Cabeza, M.; Reigada, A. Energy use and carbon footprint of the tomato production in heated multi-tunnel greenhouses in Almería within an exporting agri-food system context. *Sci. Total Environ.* **2018**, *628*, 1627–1636. [CrossRef] [PubMed]
5. Li, T.; Yang, Q. Advantages of diffuse light for horticultural production and perspectives for further research. *Front. Plant Sci.* **2015**, *6*, 704. [CrossRef]
6. Li, T.; Heuvelink, E.; Dueck, T.A.; Janse, J.; Gort, G.; Marcelis, L.F.M. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: Quantifying the contributing factors. *Ann. Bot.* **2014**, *114*, 145–156. [CrossRef]
7. Zheng, L.; Zhang, Q.; Zheng, K.; Zhao, S.; Wang, P.; Cheng, J.; Zhang, X.; Chen, X. Effects of Diffuse Light on Microclimate of Solar Greenhouse, and Photosynthesis and Yield of Greenhouse-grown Tomatoes. *HortScience* **2020**, *55*, 1605–1613. [CrossRef]
8. Li, T.; Heuvelink, E.; van Noort, F.; Kromdijk, J.; Marcelis, L.F.M. Responses of two Anthurium cultivars to high daily integrals of diffuse light. *Sci. Hortic.* **2014**, *179*, 306–313. [CrossRef]
9. Dueck, T.A.; Poudel, D.; Janse, J.; Hemming, S. *Diffuus Licht—Wat Is de Optimale Lichtverstrooiing?* Wageningen UR Glastuinbouw: Wageningen, The Netherlands, 2009; p. 50. Available online: <https://edepot.wur.nl/15806> (accessed on 25 October 2021).
10. Dueck, T.; Janse, J.; Li, T.; Kempkes, F.; Eveleens, B. Influence of diffuse glass on the growth and production of tomato. *Acta Hortic.* **2012**, *956*, 75–82. [CrossRef]
11. Ávalos-Sánchez, E.; Moreno-Teruel, M.Á.; Molina-Aiz, F.D.; López-Martínez, A.; Peña-Fernández, A.; Baptista, F.; Valera-Martínez, D.L. Influence of the Diffusivity and Transmittance of a Plastic Greenhouse Cover on the Development of Fungal Diseases in a Cucumber Crop. *Agronomy* **2022**, *12*, 2743. [CrossRef]
12. Moreno-Teruel, M.Á.; Molina-Aiz, F.D.; Peña-Fernández, A.; López-Martínez, A.; Valera-Martínez, D.L. The Effect of Diffuse Film Covers on Microclimate and Growth and Production of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in a Mediterranean Greenhouse. *Agronomy* **2021**, *11*, 860. [CrossRef]
13. Suzuki, T.; Nishimura, S.; Yagi, K.; Nakamura, R.; Takikawa, Y.; Matsuda, Y.; Kakutani, K.; Nonomura, T. Effects of light quality on conidiophore formation of the melon powdery mildew pathogen *Podosphaera xanthii*. *Phytoparasitica* **2017**, *46*, 31–43. [CrossRef]
14. Elad, Y.; Messika, Y.; Brand, M.; David, D.R.; Szejnberg, A. Effect of Colored Shade Nets on Pepper Powdery Mildew (*Leveillula taurica*). *Phytoparasitica* **2007**, *35*, 285–299. [CrossRef]
15. Oerke, E.C.; Steiner, U.; Dehne, H.W.; Lindenthal, M. Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions. *J. Exp. Bot.* **2006**, *57*, 2121–2132. [CrossRef]
16. Leiminger, J.H.; Hausladen, H. Early Blight Control in Potato Using Disease-Orientated Threshold Values. *Plant Dis.* **2012**, *96*, 124–130. [CrossRef] [PubMed]
17. Abuley, I.K.; Nielsen, B.J. Evaluation of models to control potato early blight (*Alternaria solani*) in Denmark. *Crop Prot.* **2017**, *102*, 118–128. [CrossRef]
18. Hawkins, N.J.; Bass, C.; Dixon, A.; Neve, P. The evolutionary origins of pesticide resistance. *Biol. Rev.* **2019**, *94*, 135–155. [CrossRef]

4. Efecto de las cubiertas plásticas en el desarrollo de enfermedades fúngicas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y pimiento (*Capsicum annuum* L.) en invernaderos Mediterráneos

19. Zheng, Z.; Nonomura, T.; Appiano, M.; Pavan, S.N.; Matsuda, Y.; Toyoda, H.; Wolters, A.M.A.; Visser, R.G.F.; Bai, Y.; Vinatzer, B.A. Loss of Function in Mlo Orthologs Reduces Susceptibility of Pepper and Tomato to Powdery Mildew Disease Caused by *Leveillula taurica*. *PLoS ONE* **2013**, *8*, 70723. [CrossRef]
20. Hüchelhoven, R. Powdery mildew susceptibility and biotrophic infection strategies. *FEMS Microbiol. Lett.* **2005**, *245*, 9–17. [CrossRef]
21. Guzman-Plazola, R.A.; Davis, M.R.; Marois, J.J. Effects of relative humidity and high temperature on spore germination and development of tomato powdery mildew (*Leveillula taurica*). *Crop Prot.* **2003**, *22*, 1157–1168. [CrossRef]
22. Itagaki, K.; Shibuya, T. Differences in early hyphal development of *Podosphaera xanthii* on *Cucumis sativus* leaves acclimatized to high or low relative humidity. *Botany* **2018**, *96*, 67–71. [CrossRef]
23. Lage, D.; Waldir, A.; Marouelli, A.; Café-Filho, C. Management of powdery mildew and behaviour of late blight under different irrigation configurations in organic tomato. *Crop Prot.* **2019**, *125*, 104886. [CrossRef]
24. Molina-Aiz, F.D.; Valera, D.L.; Álvarez, A.J. Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol.* **2004**, *125*, 33–51. [CrossRef]
25. Cerkauskas, R.F.; Buonassisi, A. First report of powdery mildew of greenhouse pepper caused by *Leveillula taurica* in British Columbia, Canada. *Plant Dis.* **2003**, *87*, 1151. [CrossRef] [PubMed]
26. Parisi, M.; Alioto, D.; Tripodi, P. Overview of biotic stresses in pepper (*Capsicum* spp.): Sources of genetic resistance, molecular breeding and genomics. *Int. J. Mol. Sci.* **2020**, *21*, 2587. [CrossRef] [PubMed]
27. Shinde, B.A.; Dholakia, B.B.; Hussain, K.; Aharoni, A.; Giri, A.P.; Kamble, A.C. WRKY1 acts as a key component improving resistance against *Alternaria solani* in wild tomato, *Solanum arcanum* Peralta. *Plant Biotechnol. J.* **2018**, *16*, 1502–1513. [CrossRef] [PubMed]
28. Akhtar, K.P.; Ullah, N.; Saleem, M.Y.; Iqbal, Q.; Asghar, M.; Khan, A.R. Evaluation of tomato genotypes for early blight disease resistance caused by *Alternaria solani* in Pakistan. *J. Plant Pathol.* **2019**, *101*, 1159–1170. [CrossRef]
29. Rotem, J.; Reichert, I. Dew a principal moisture factor enabling early blight epidemics in a semiarid region of Israel. *Plant Dis. Rep.* **1964**, *48*, 211–215.
30. Zhang, N.; Wu, H.; Zhu, H.; Deng, Y.; Han, X. Tomato Disease Classification and Identification Method Based on Multimodal Fusion Deep Learning. *Agriculture* **2022**, *12*, 2014. [CrossRef]
31. Gannibal, P.B.; Orina, A.S.; Mironenko, N.V.; Levitin, M.M. Differentiation of the closely related species, *Alternaria solani* and *A. tomatophila*, by molecular and morphological features and aggressiveness. *Eur. J. Plant Pathol.* **2014**, *139*, 609–623. [CrossRef]
32. Abuley, I.K.; Nielsen, B.J.; Hansen, H.H. The influence of crop rotation on the onset of early blight (*Alternaria solani*). *J. Phytopathol.* **2019**, *167*, 35–40. [CrossRef]
33. Desta, M.; Yesuf, M. Efficacy and economics of fungicides and their application schedule for early blight (*Alternaria solani*) management and yield of tomato at South Tigray Ethiopia. *J. Plant Pathol. Microbiol.* **2015**, *6*, 1–6. [CrossRef]
34. Bessadat, N.; Berruyer, R.; Hamon, B.; Kihal, M.; Henni, D.E.; Simoneau, P.; Bataille-Simoneau, N.; Benichou, S. *Alternaria* species associated with early blight epidemics on tomato and other Solanaceae crops in northwestern Algeria. *Eur. J. Plant Pathol.* **2016**, *148*, 181–197. [CrossRef]
35. Abuley, I.K.; Nielsen, B.J.; Labouriau, R. Resistance status of cultivated potatoes to early blight (*Alternaria solani*) in Denmark. *Plant Pathol.* **2018**, *67*, 315–326. [CrossRef]
36. Raviv, M.; Reuveni, R. Fungal photomorphogenesis: A basis for the control of foliar diseases using photosensitive covering materials for greenhouses. *HortScience* **1998**, *33*, 925–929. [CrossRef]
37. Kanto, T.; Watanabe, K.; Uchihashi, K.; Nishino, M.; Sato, F.; Arii, M. Ultraviolet B radiation from a compact fluorescent lamp for tomato disease control. *Acta Hortic.* **2018**, *1207*, 197–202. [CrossRef]
38. Suthaparan, A.; Torre, S.; Mortensen, L.M.; Gislerød, H.R.; Solhaug, K.A.; Stensvand, A.; Gadoury, D.M. Interruption of the night period by UV-B suppresses powdery mildew of rose and cucumber. *Acta Hortic.* **2012**, *956*, 617–620. [CrossRef]
39. Su, Y.Y.; Qi, Y.L.; Cai, L. Induction of sporulation in plant pathogenic fungi. *Mycology* **2012**, *3*, 195–200. [CrossRef]
40. UNE-EN 13206: 2017+A1; Plastics—Thermoplastic Covering Films for Use in Agriculture and Horticulture. Asociación Española de Normalización (UNE): Madrid, Spain, 2020; p. 6. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0064784> (accessed on 11 November 2022).
41. ASTM D 1003-13; Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics. American Society for Testing and Materials (ASTM): West Conshohocken, PA, USA, 2021; p. 64. Available online: <https://www.astm.org/Standards/D1003.htm> (accessed on 11 November 2022).
42. López-Martínez, A.; Valera-Martínez, D.L.; Molina-Aiz, F.D.; Moreno-Teruel, M.Á.; Peña-Fernández, A.; Espinoza-Ramos, K.E. Analysis of the Effect of Concentrations of Four Whitening Products in Cover Transmissivity of Mediterranean Greenhouses. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *16*, 958. [CrossRef]
43. Valera, D.L.; Belmonte, L.J.; Molina-Aiz, F.D.; López, A. *Greenhouse Agriculture in Almería. A Comprehensive Techno-Economic Analysis*; Publicaciones Cajamar: Almería, Spain, 2016; p. 408. Available online: <http://www.publicacionescajamar.es/series-tematicas/economia/greenhouse-agriculture-in-almeria-a-comprehensive-techno-economic-analysis/> (accessed on 18 November 2022).
44. Parvatha Reddy, P. *Sustainable Crop Protection Under Protected Cultivation*, 1st ed.; Springer: Singapore, 2016; p. 434. [CrossRef]
45. Zheng, Z.; Nonomura, T.; Bóka, K.; Matsuda, Y.; Visser, R.G.; Toyoda, H.; Kiss, L.; Bai, Y. Detection and Quantification of *Leveillula taurica* Growth in Pepper Leaves. *Phytopathology* **2013**, *103*, 623–632. [CrossRef]

46. Steelheart, C.; Alegre, M.L.; Vera Bahima, J.; Senn, M.E.; Simontacchi, M.; Bartoli, C.G.; Gergoff Grozeff, G.E. Nitric oxide improves the effect of 1-methylcyclopropane extending the tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) fruit postharvest life. *Sci. Hortic.* **2019**, *255*, 193–201. [CrossRef]
47. Jiang, C.; Johkan, M.; Hohjo, M.; Tsukagoshi, S.; Ebihara, M.; Nakaminami, A.; Maruo, T. Photosynthesis, plant growth, and fruit production of single-truss tomato improves with supplemental lighting provided from underneath or within the inner canopy. *Sci. Hortic.* **2017**, *222*, 221–229. [CrossRef]
48. Hernández, J.; Bonachela, S.; Granados, M.R.; López, J.C.; Magán, J.J.; Montero, J.I. Microclimate and agronomical effects of internal impermeable screens in an unheated Mediterranean greenhouse. *Biosyst. Eng.* **2017**, *163*, 66–77. [CrossRef]
49. Melilli, M.G.; Tringali, S.; Raccua, S.A. Reduction of browning phenomena of minimally processed artichoke hearts. *Acta Hortic.* **2016**, *1147*, 223–236. [CrossRef]
50. Statgraphics Statgraphics ©18. User Manual. Statgraphics Technologies. Available online: <https://www.statgraphics.net/wp-983content/uploads/2015/03/Centurion-XVI-Manual-Principal.pdf> (accessed on 29 October 2022).
51. Pathak, Å.; Stensvand, A.; Gislerød, H.R.; Solhaug, K.A.; Cadle-Davidson, L.; Suthaparan, A. Functional Characterization of Pseudoidium neolycopersici Photolyase Reveals Mechanisms Behind the Efficacy of Nighttime UV on Powdery Mildew Suppression. *Front. Microbiol.* **2020**, *11*, 1091. [CrossRef] [PubMed]
52. Janisiewicz, W.J.; Takeda, F.; Nichols, B.; Glenn, D.M.; Jurick, I. Use of low-dose UV-C irradiation to control powdery mildew caused by Podosphaera aphanis on strawberry plants. *Can. J. Plant Pathol.* **2016**, *38*, 430–439. [CrossRef]
53. Suthaparan, A.; Solhaug, K.A.; Stensvand, A.; Gislerød, H.R. Daily light integral and day light quality: Potentials and pitfalls of nighttime UV treatments on cucumber powdery mildew. *J. Photochem. Photobiol.* **2017**, *175*, 141–148. [CrossRef] [PubMed]
54. Suthaparan, A.; Pathak, R.; Solhaug, K.A.; Gislerød, H.R. Wavelength dependent recovery of UV-mediated damage: Tying up the loose ends of optical based powdery mildew management. *J. Photochem. Photobiol.* **2018**, *178*, 631–640. [CrossRef]
55. Buckland, K.R.; Ocomb, C.M.; Rasmussen, A.L.; Nackley, L.L. Reducing Powdery Mildew in High-tunnel Tomato Production in Oregon with UltraViolet-C Lighting. *HortTechnology* **2023**, *33*, 149–151. [CrossRef]
56. Li, T.; Zhou, J.; Liu, R.; Yuan, Z.; Li, J. Effects of photo-selective nets and air humidity coupling on tomato resistance to Botrytis cinerea. *Sci. Hortic.* **2022**, *305*, 111356. [CrossRef]
57. Diop-Bmckler, M. Effect of climatic factors on development of Leveillula taurica and susceptibility of Capsicum annum at different vegetative stages. *J. Phytopathol.* **1989**, *126*, 104–114. [CrossRef]
58. Fardhani, D.M.; Kharisma, A.D.; Kobayashi, T.; Arofatullah, N.A.; Yamada, M.; Tanabata, S.; Yokoda, Y.; Widiastuti, A.; Sato, T. Ultraviolet-B Irradiation Induces Resistance against Powdery Mildew in Cucumber (*Cucumis sativus* L.) through a Different Mechanism Than That of Heat Shock-Induced Resistance. *Agronomy* **2022**, *12*, 3011. [CrossRef]
59. Vázquez, H.; Ouhibi, C.; Forges, M.; Lizzi, Y.; Urban, L.; Aarrouf, J. Hormetic doses of UV-C light decrease the susceptibility of tomato plants to Botrytis cinerea infection. *J. Phytopathol.* **2020**, *168*, 524–532. [CrossRef]
60. Meno, L.; Escuredo, O.; Abuley, I.K.; Seijo, M.C. Importance of Meteorological Parameters and Airborne Conidia to Predict Risk of Alternaria on a Potato Crop Ambient Using Machine Learning Algorithms. *Sensors* **2022**, *22*, 7063. [CrossRef] [PubMed]
61. Lu, T.; Yu, H.; Li, Q.; Chai, L.; Jiang, W. Improving plant growth and alleviating photosynthetic inhibition and oxidative stress from low-light stress with exogenous gr24 in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings. *Front. Plant Sci.* **2019**, *10*, 490. [CrossRef] [PubMed]
62. Papaioannou, C.; Katsoulas, N.; Maletsika, P.; Siomos, A.; Kittas, C. Effects of a UV-absorbing greenhouse covering film on tomato yield and quality. *Span. J. Agric. Res.* **2012**, *10*, 959. [CrossRef]
63. Petropoulos, S.A.; Fernandes, Å.; Katsoulas, N.; Barros, L.; Ferreira, I. The effect of covering material on the yield, quality and chemical composition of greenhouse-grown tomato fruit. *J. Sci. Food Agric.* **2019**, *99*, 3057–3068. [CrossRef]
64. Hee, C.; SungHyun, Y.; YunIm, K.; HarkJu, K.; SiYoung, L. Environments and Canopy Productivity of Green Pepper (*Capsicum annum* L.) in a Greenhouse Using Light-diffused Woven Film. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* **2005**, *23*, 367–371.
65. Hemming, S.; van der Braak, N.; Dueck, T.; Jongschaap, R.; Marissen, N. Filtering Natural Light by the Greenhouse Covering Using Model Simulations—More Production and Better Plant Quality by Diffuse Light? *Acta Hortic.* **2006**, *711*, 105–110. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

5. Influencia del uso de doble techo, combinado con el incremento de superficie de ventilación, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero multitúnel mediterráneo

Resumen

Los invernaderos de la costa mediterránea se caracterizan por el uso de técnicas de control climático pasivo, evitando así aportes energéticos que encarecerían la producción de cultivos. El uso de doble techo en invernaderos de la zona de Almería es una técnica muy extendida, debido al aumento de temperatura que esta técnica puede producir en invierno, lo que mejora el desarrollo de los cultivos hortícolas de la zona, aunque podría limitar la ventilación de los invernaderos. Este estudio analizó dos ciclos de cultivo de solanáceas y dos ciclos de cultivo de cucurbitáceas. Los ciclos de cultivo de solanáceas fueron; el primer ciclo en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de febrero a julio de 2021 y el segundo ciclo en un cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) de febrero a julio de 2022. Los ciclos de cultivo de cucurbitáceas fueron ambos en pepino (*Cucumis sativus* L.) de septiembre a diciembre, en dos años diferentes 2020 y 2021. El estudio se llevó a cabo en Almería (España), en un invernadero multitúnel, dividido transversalmente por una lámina de polietileno. En este invernadero encontramos dos sectores diferentes, uno que no usa doble techo y el otro con una lámina plástica experimental con un plástico foto conversor, utilizado como doble techo dentro del invernadero, que modificó las condiciones climáticas de forma pasiva en este sector. Además, el sector cubierto por doble techo presenta una ventilación lateral con una apertura de 3 metros de altura máxima, mientras que el sector sin doble techo presentaba una ventilación con una apertura lateral de 0,9 metros de altura máxima. Se encontraron dos enfermedades que se desarrollaron naturalmente en el cultivo de solanáceas; (i) oídio (*Leveillula taurica*) tanto en el ciclo del tomate como del pimiento, enfermedad que es endémica en esta zona de cultivo, y (ii) el tizón temprano (*Alternaria solani*) en el cultivo de tomate. En el caso de los ciclos de cucurbitáceas, se encontraron tres enfermedades que se desarrollaron naturalmente sobre los cultivos; (i) mildiús (*Pseudoperonospora cubensis*), (ii) oídio (*Sphaerotheca fuliginea*) y (iii) tizón del tallo gomoso (*Didymella bryoniae*). En este estudio se observó que las

áreas de invernadero que no utilizaron doble techo alcanzaron niveles más altos de las diferentes enfermedades, que las áreas que sí utilizaron doble techo, diferenciándose estadísticamente.

Palabras clave: doble techo en invernadero, manejo climático de invernadero, manejo de enfermedades, protección de cultivos, oídio.

1. Objetivo

El objetivo de este trabajo es analizar el efecto que producen las técnicas de control climático pasivo, especialmente el uso de doble techo, sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en pepino, tomate y pimiento en invernaderos mediterráneo.

2. Material y Métodos

2.1. Invernaderos ensayados

Este ensayo se realizó en la Finca experimental UAL-ANECOOP, en un invernadero multitúnel, el cual tenía dos sectores aislados separados por una lámina de polietileno. En uno de los sectores (C1) se colocó doble techo, con un material plástico foto conversor, combinado con una ventilación lateral con una apertura máxima de tres metros de alto, un tipo de ventilación no habitual en los invernaderos de la zona. En el otro sector (No) no se usó doble techo y la ventilación lateral tenía una apertura máxima de 0,9 m, una ventilación más próxima a lo habitual en la zona de Almería. Ambos sectores aislados se regaron con diferentes dotaciones de riego, para observar el efecto de las técnicas de control climático sobre plantas estresadas. En la Figura I. 1 se observa la distribución del ensayo.

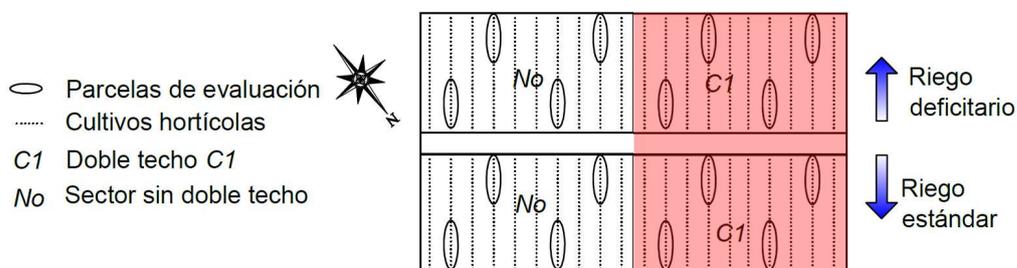


Figura I. 1. Instalación del doble techo en el invernadero, distribución del ensayo, parcelas de evaluación y dotaciones de riego.

2.2. Cultivos

El estudio se realizó en cuatro ciclos diferentes de cultivo. Dos ciclos de pepino de otoño invierno (07/09/2020 - 02/01/2021, y 05/09/2021 - 02/01/2022), un ciclo de tomate de primavera verano (07/02/2021 - 15/07/2021) y otro ciclo de pimiento de primavera verano (20/02/2022 - 29/07/2022). Todos los cultivos se desarrollaron sobre un sustrato de fibra de coco con riego por goteo, con una densidad de siembra de 1 planta por metro cuadrado, en todos los casos.

2.3. Evaluación de las diferentes enfermedades en los cultivos

Para la evaluación de las diferentes enfermedades se siguieron las normativas EPPO. Para las enfermedades del mildiú y del oídio, EPPO PP 1/181 (Realización de informes de ensayos de evaluación y eficacia), EPPO PP 1/152 (Diseño y análisis de ensayos de evaluación y eficacia), EPPO PP 1/57 (Oídio en cucurbitáceas), EPPO PP 1/65 (Mildiú de la lechuga y otras hortalizas) EPPO 1/263 (*Alternaria solani* y *Alternaria alternata* sobre patata y tomate), EPPO 1/135 (Evaluación de fitotoxicidad) y EPPO 1/121 (Manchas en hojas de vegetales).

2.4. Análisis estadístico

Se analizaron 50 hojas en cada una de las parcelas de evaluación, que se correspondían con una repetición. Estudiando en todos los casos analizados 4 repeticiones, para cada zona afectada por diferentes sistemas de control climático y riego.

El análisis estadístico de los datos se realizó con el software Statgraphics Centurion v.19 (Manugistics Inc., Rockville, MD, EE. UU.), utilizando un análisis de varianza (considerado significativo si el valor de p es $\leq 0,05$), comparando los valores medios con el procedimiento de mínima diferencia significativa de Fisher (LSD).

3. Resultados

En este trabajo aparecieron de forma natural sobre los cultivos diferentes enfermedades fúngicas, que son endémicas en el área de Almería. En los ciclos de cucurbitáceas se evaluaron tres enfermedades, que aparecieron en ambos ciclos: oídio causado por el patógeno *S. fuliginea*, mildiú causado por el patógeno *P. cubensis* y tizón gomoso del tallo causado por el patógeno *D. bryoniae*.

Los otros dos ciclos de cultivo fueron ciclos de solanáceas, uno en tomate y otro en pimiento. Dos enfermedades fúngicas atacaron los cultivos de solanáceas durante el desarrollo de este trabajo: oídio, causado por el patógeno *L. taurica*, que se desarrolló durante los dos ciclos de cultivo tanto en pimiento como en tomate, y tizón temprano, causado por el patógeno *A. solani*, que solo se desarrolló sobre el ciclo de tomate.

El oídio fue la principal enfermedad que se observó en el desarrollo de este trabajo, aunque con diferentes patógenos apareció en todos los ciclos de cultivo y en todas las variantes propuestas en el ensayo. Esta enfermedad también alcanzó los niveles de porcentaje de infección más altos sobre los cultivos, alcanzando en ocasiones en algunas parcelas porcentajes de infección superiores al 60 %. Estos niveles tan altos de infección provocaron en la mayoría de los casos el final prematuro de los ciclos de cultivo.

3.1 . Oídio

3.1.1. Oídio en cucurbitáceas

En el primer ciclo de cucurbitáceas se observaron las primeras manchas de oídio en el mes de octubre de 2020, finalizado la evaluación el 24 de Diciembre de 2020. El segundo ciclo de cucurbitáceas, mostró un desarrollo de la enfermedad similar al primer ciclo, observándose los primeros síntomas en octubre de 2021 y terminado la evaluación el 11 de Diciembre de 2021, como se observa en la Figura I. 2.

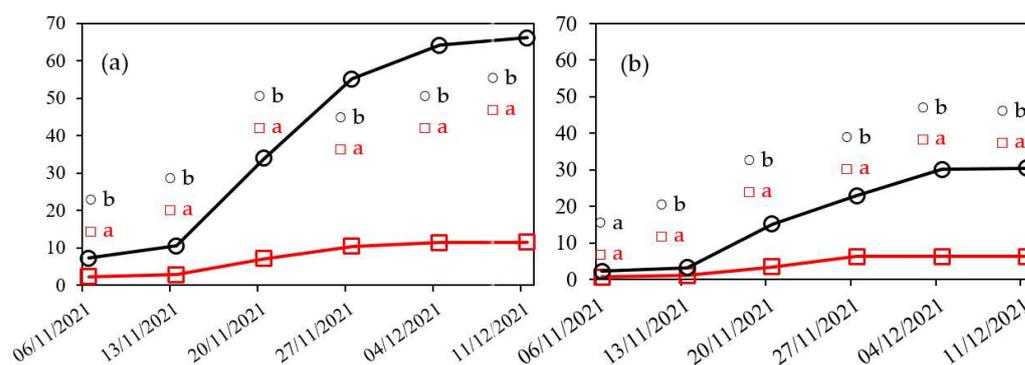


Figura I. 2. Porcentaje de infección de oídio (*S. fuliginea*) en el ciclo de cultivo de 2021: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo plástico (□); Sector sin doble techo plástico (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

En la Figura I. 2 podemos observar la evolución de la enfermedad en el segundo ciclo de cultivo. Observamos como la enfermedad alcanzó

valores en torno al 60 % de infección en las zonas más atacadas. Durante el desarrollo de la enfermedad se observaron siempre valores de infección más altos en las zonas que no estaban cubiertas por el doble techo. Se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas siempre que el porcentaje de infección superó el 5 %.

El doble techo retrasó el desarrollo de oídio (Figura I. 2). En las zonas sin doble techo se observaron los porcentajes de enfermedad más altos (con una superficie de ventilación del 17%), en comparación con las zonas que tenían doble techo en el invernadero (con una superficie de ventilación del 32%).

En la Figura I. 2 también se observa como la dotación de riego influye en la presencia de oídio sobre el cultivo. Así, se observaron siempre mayores niveles de infección en las zonas regadas con una dotación estándar, sin déficit. En este caso, las comparaciones son entre zonas de estudio que presentan las mismas técnicas agronómicas de control climático pasivo, solo se diferencian en la dotación de riego. En este caso, también se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en la mayoría de las evaluaciones.

3.1.2. Oídio en solanáceas

En abril de 2021 se observaron los primeros síntomas de oídio (patógeno *L. taurica*) sobre el cultivo de tomate. Las evaluaciones empezaron cuando los síntomas producidos por la enfermedad fueron lo suficientemente altos para ser representativos en todas las parcelas. La enfermedad fue monitoreada hasta el 10 de julio de 2021, cerca del final del ciclo de cultivo. En este momento del ensayo algunas parcelas evaluadas alcanzaron índices de infección en torno al 60 % en las parcelas con mayor ataque.

El cultivo de pimiento fue sembrado en una fecha similar al ciclo del tomate, pero en 2022. En tomate y pimiento el patógeno responsable de la aparición de oídio fue el mismo, *L. taurica*. En el ciclo del pimiento se observaron los primeros síntomas de la enfermedad en abril de 2022. Las evaluaciones comenzaron en mayo de 2022, momento en el que era posible evaluar la enfermedad en todas las parcelas estudiadas. Al igual que en el ciclo del tomate se alcanzaron tasas de infección elevadas superiores al 50 % en las parcelas más afectadas por la enfermedad, aunque la frecuencia de daños en hojas afectadas fue muy superior.

La Figura I. 3 muestra la evolución de la enfermedad en el ciclo de cultivo de tomate, para el ciclo de pimiento es similar.

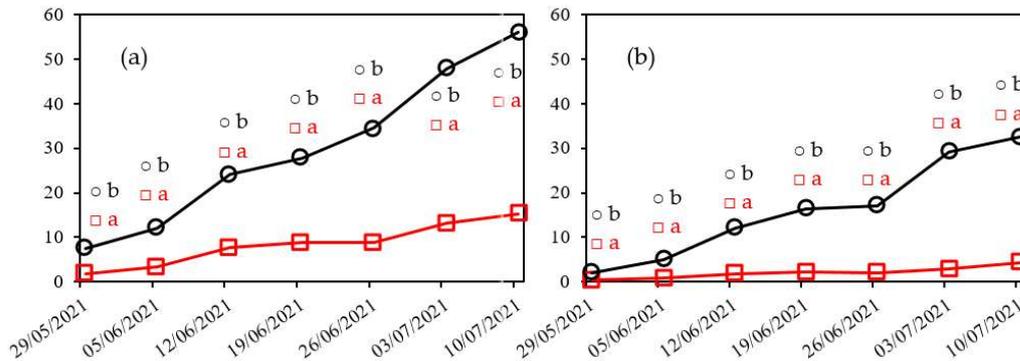


Figura I. 3. Porcentaje de infección de oídio (*L. taurica*) en el ciclo de tomate de 2021: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo plástico (□); Sector sin doble techo plástico (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

Al igual que en el caso de oídio en cucurbitáceas, para solanáceas, el oídio se comportó igual, aunque sean patógenos diferentes. En la Figura I. 3 podemos observar que las zonas que no estaban cubiertas por el doble techo desarrollaron un nivel de enfermedad más elevado que las zonas cubiertas por el doble techo. La combinación de ventilación natural con el uso de doble techo produjo una reducción de los daños de oídio sobre el cultivo muy interesantes, observándose diferencias estadísticamente significativas casi desde el inicio de las evaluaciones, tanto en el cultivo de tomate como en el de pimiento. En las zonas no protegidas por el doble techo observamos unos daños en hoja, tanto en tomate como en pimiento muy elevados.

En el caso de las comparaciones entre zonas con dotación de riego deficitaria y zonas con suministro de riego sin déficit, se observó otra vez, como las zonas con déficit de riego presentaron menor nivel de infección de oídio, diferenciándose estadísticamente, casi en todos los momentos de evaluación, cuando el porcentaje de infección era suficiente para establecer una comparación entre parcelas.

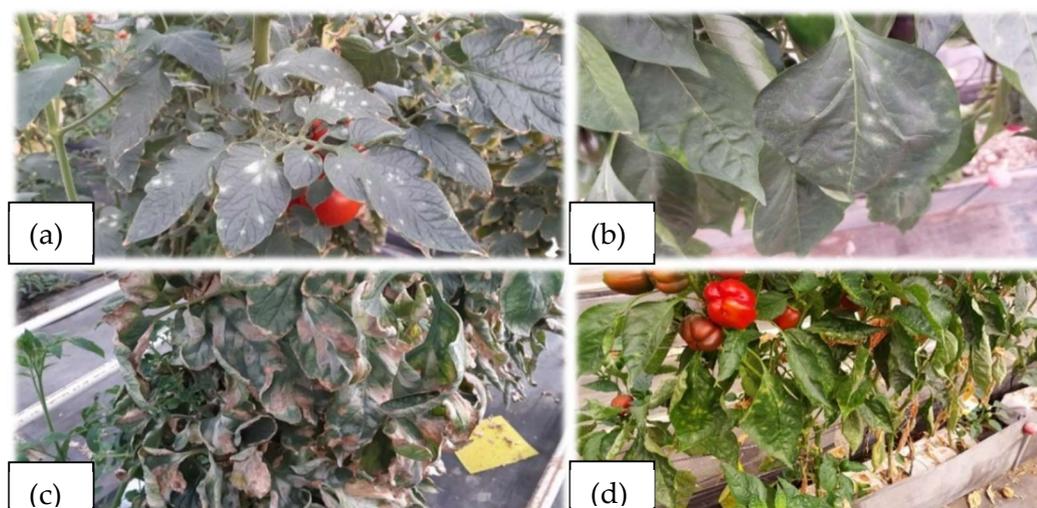


Figura I. 4. Oídio, a. oídio en tomate; b. oídio en pimiento; c. fuerte ataque de oídio en el área sin doble techo en tomate; d. fuerte ataque de oídio en pimiento, con defoliación en el área sin doble techo.

3.2. Mildiús

Durante los cuatro ciclos de cultivo analizados, solo apareció mildiús en los ciclos de cucurbitáceas, un hecho normal ya que son ciclos de otoño invierno, que por las condiciones climáticas de la zona son más propicias para la aparición de esta enfermedad. Normalmente las condiciones climáticas del área de Almería no son propicias para el desarrollo de esta enfermedad en los cultivos en ciclos de primavera verano, y menos en solanáceas, las cucurbitáceas son más sensibles a esta enfermedad, pudiéndose observar ataques en primavera, incluso en verano.

En los ciclos de pepino el patógeno responsable de la aparición de la enfermedad fue *P. cubensis*. La incidencia de mildiús en el invernadero estudiado fue menor que en el caso de oídio, sin embargo durante el primer ciclo en 2020 alcanzó tasas de infección superiores al 10 por ciento. Estos niveles de enfermedad serían preocupantes en un invernadero comercial, lo suficiente como para hacer una aplicación foliar con algún fungicida.

El uso de dobles techos produjo una reducción especialmente importante en el desarrollo de mildiús. La Figura I. 5 muestra como las áreas cubiertas con doble techo prácticamente no presentaron mildiús, presentando valores inferiores al 1 por ciento en todos los casos. Este

nivel de enfermedad fue prácticamente inexistente debajo del doble techo de plástico.

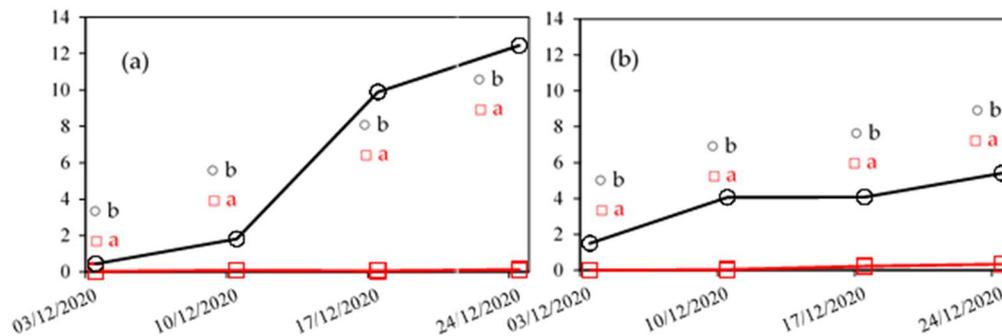


Figura I. 5. Porcentaje de infección en hoja de mildiús (*P. cubensis*) en el primer ciclo de cultivo de pepino de 2020: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo plástico (□); Sector sin doble techo plástico (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

El desarrollo de mildiús se vio muy afectado por la combinación de una mayor ventilación y el uso de doble techo, siendo su presencia en las zonas con gran ventilación y cubiertas por doble techo prácticamente inexistente.

Al igual que en el caso de oídio una dotación de riego deficitaria redujo la presencia de la enfermedad, aunque en este caso las diferencias estadísticas no se dieron en la mayoría de las evaluaciones solo en momentos puntuales, como al final del ciclo de 2020.

3.3. Tizón del tallo gomoso

El tizón del tallo gomoso fue la enfermedad que menos incidencia tubo en el cultivo de pepino, esta enfermedad solo apareció en los ciclos de cucurbitáceas y al igual que mildiús, se desarrolló principalmente en las zonas con menor ventilación y sin dobles techos.

Tanto en el caso del primer como del segundo ciclo, la enfermedad apareció tres semanas antes de la última evaluación y la evolución de la enfermedad fue lenta, por lo que no alcanzó niveles elevados de daño al cultivo. Aun así, pudimos observar tendencias similares a las observadas previamente en este trabajo.

Las evaluaciones del tizón del tallo gomoso mostraron que el uso de doble techo y una mayor ventilación natural también retrasa el desarrollo

de la enfermedad, incluso con un nivel de enfermedad inferior a los evaluados previamente, como se puede observar en la Figura I. 6.

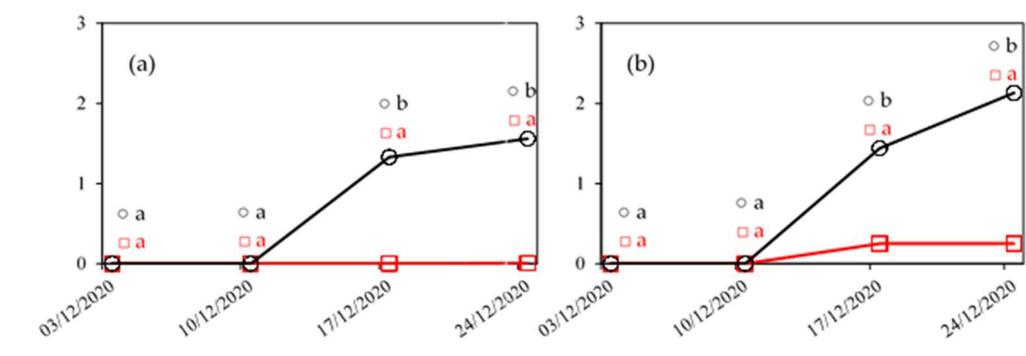


Figura I. 6. Porcentaje de infección en hoja del tizón del tallo gomoso (*D. bryoniae*) en el primer ciclo de cultivo de pepino de 2020: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo plástico (□); Sector sin doble techo plástico (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

En este caso observamos diferencias estadísticas al final del ciclo de cultivo para las zonas estudiadas, aunque no se observaron diferencias debidas a la dotación de riego, como en los casos anteriores, quizás porque no se alcanzó un nivel suficiente de enfermedad en ninguno de los ciclos de pepino.

Las áreas con mayor ventilación natural presentaron un menor nivel de daño en el cultivo debido a enfermedades fúngicas. Aunque en este caso la combinación de sistemas pasivos de climatización no controló la enfermedad de una forma tan drástica como en el caso del mildiús. Aun así, la reducción del porcentaje de infección del tizón del tallo gomoso resultó de notable interés para el manejo del clima y de enfermedades.

3.4. Tizón temprano

El tizón temprano apareció en el cultivo de tomate. En los ciclos primaverales puede aparecer el tizón temprano en el cultivo de tomate, pero en nuestro caso apareció en los meses de mayo y junio, que para esta zona es un poco tardío, las condiciones climáticas de la zona en el año 2021 y las lluvias distribuidas en estos meses ayudaron al desarrollo de la enfermedad.

El tizón temprano alcanzó niveles de infección más bajos que el oídio, siendo claramente una enfermedad secundaria en el cultivo de tomate en nuestro caso, aun así alcanzó niveles de infección superiores al 10 por

ciento, que para un productor de tomate de la zona sería motivo de preocupación y suficiente para realizar tratamientos fitosanitarios para controlar esta enfermedad, debido a la necrosis que puede producir el tizón temprano, reduciendo la actividad fotosintética de la planta, y la posibilidad de que manche los frutos y afecte la calidad de la cosecha.

En la Figura I. 7 observamos la evolución de la enfermedad en el ciclo de tomate.

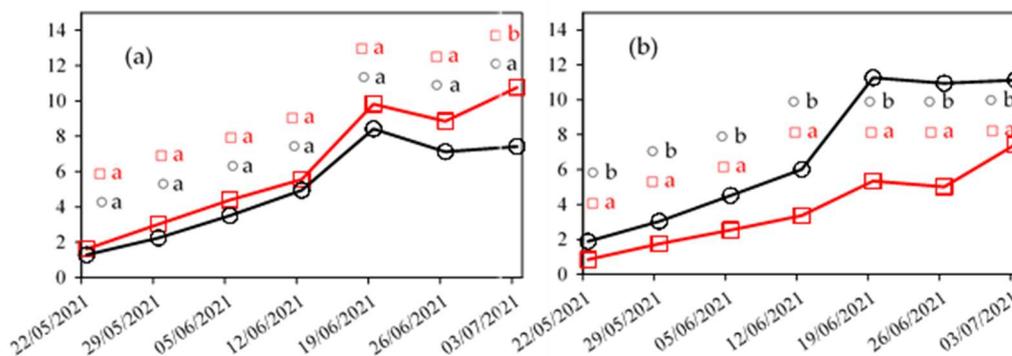


Figura I. 7. Porcentaje de infección en hoja del tizón temprano (*A. solani*) en el ciclo de tomate de 2021: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo plástico (□); Sector sin doble techo plástico (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

En este caso observamos como en la Figura I. 7, en las zonas Sur se sigue una tendencia similar a las enfermedades estudiadas anteriormente, pero en las zonas Norte no se sigue la tendencia observada, incluso numéricamente aunque no haya diferencias estadísticamente significativas, es inversa. Esto quizás pueda deberse a que esta enfermedad se vio claramente influenciada por las condiciones climáticas externas a los invernaderos, y las zonas de mayor ventilación en este caso, durante los episodios de precipitación, aumentaban la humedad dentro del invernadero en vez de reducirla. También por la localización del invernadero, ya que las ventanas de la zona Norte no tienen obstáculos delante de ellas dan a una zona libre en más de 10 metros, mientras que la zona Sur, tiene a 3 metros otro invernadero, lo que influiría en las zonas estudiadas y el efecto de las condiciones climáticas externas sobre el interior del invernadero.

4. Conclusiones

El uso de dobles techos en invernadero redujo el desarrollo de las enfermedades fúngicas analizadas: mildiús (*P. cubensis*), oídio (*S. fuliginea* y *L. taurica*), tizón del tallo gomoso (*D. bryoniae*) y tizón temprano (*A. solani*). El oídio fue la enfermedad que mejor se desarrolló en esta zona, la que mejor se adapta a las condiciones locales. Las condiciones de luz y ambiente bajo el doble techo disminuyeron la presencia de oídio en el cultivo.

En el caso del mildiús, debido a la drástica disminución de agua libre en el cultivo, el uso de doble techo en invernadero redujo significativamente el porcentaje de infección y el desarrollo de esporas de *P. cubensis*.

El tizón temprano se vio menos afectado por el uso de dobles techos y la ventilación natural que otras enfermedades. Aunque solo se pudo estudiar en un ciclo, la tendencia mostrada es similar a la del oídio, pero los datos son menos consistentes que en el caso del oídio.

La ventilación en el invernadero tuvo una influencia importante en el desarrollo de todas las enfermedades fúngicas estudiadas. El manejo de la ventilación fue una herramienta crucial para reducir el efecto de las enfermedades fúngicas en los cultivos.

Las áreas de regadío estándar presentaron un mayor nivel de enfermedad que las áreas de regadío con un déficit de riego del 20%, posiblemente debido a que las áreas de cultivo sin déficit hídrico no estaban estresadas y eran más apetecibles para los patógenos.

Estas estructuras de bajo coste, que gestionan las condiciones climáticas dentro de los invernaderos, podrían ayudar en el control o reducción de los niveles de las enfermedades fúngicas, evitando la aparición de resistencias a las sustancias activas permitidas contra el control de enfermedades fúngicas en los cultivos hortícolas europeos, además de reducir la resistencia a los principios activos utilizados para el control de enfermedades fúngicas, con un menor uso de los mismos y evitando una excesiva repetición en su aplicación.

6. Manejo de enfermedades fúngicas en invernaderos Mediterráneos usando dobles techos foto conversores en combinación con ventilación natural

Resumen

El uso de dobles techos en invernaderos es una técnica pasiva de control climático utilizada para aumentar la temperatura dentro de los invernaderos durante las épocas de invierno, además mejora algunas características de los cultivos. Se ha desarrollado una nueva tecnología que modifica las características de la radiación solar que llega al cultivo, en este trabajo se estudió la combinación de doble techo con plásticos que modifican las características lumínicas que llegan a los cultivos y, cómo esta técnica pasiva influye en el desarrollo de enfermedades fúngicas sobre los cultivos. El estudio se realizó en Almería (España), en dos invernaderos multitúnel, con diferentes superficies de ventilación, divididos por láminas de polietileno, en cuatro sectores aislados por invernadero. En cada invernadero encontramos cuatro sectores, dos con un plástico estándar usado como doble techo y los otros con una lámina de plástico experimental foto conversor, utilizado como doble techo (C1 en el invernadero 1 y C2 en el invernadero 2). Este estudio analizó dos ciclos de cultivo de solanáceas (*Solanum lycopersicum* L. y *Capsicum annuum* L.) y dos ciclos de cultivo de cucurbitáceas (*Cucumis sativus* L.) desde 2020 hasta 2022 en cuatro sesiones de cultivo diferentes. Se observó el desarrollo de tres enfermedades en los ciclos de Cucurbitáceas; (i) mildiús (*Pseudoperonospora cubensis*), (ii) oídio (*Sphaerotheca fuliginea*) y (iii) tizón del tallo gomoso (*Didymella bryoniae*). Para los ciclos de cultivo de solanáceas se observaron 2 enfermedades (i) oídio (*Leveillula taurica*) tanto en el ciclo de tomate como de pimiento, y (ii) tizón temprano (*Alternaria solani*) en el ciclo de tomate. En este estudio se observó que las áreas de invernadero que se cubrieron con plásticos foto conversores, usados como doble techo, alcanzaron menores niveles de porcentaje de infección de enfermedades fúngicas, que las áreas que usaron un plástico estándar como doble techo, diferenciándose estadísticamente. También se observó la influencia de las diferentes superficies de ventilación en el desarrollo de las enfermedades descritas en este trabajo.

Palabras clave: doble techo en invernadero, plásticos foto conversores, manejo de enfermedades, protección de cultivos, ventilación

1. Objetivo

La combinación de las técnicas de control climático pasivo descritas anteriormente con el uso de dobles techos con plásticos foto conversores, podría ser una herramienta interesante para gestionar la sanidad de los cultivos. Así, con la premisa de la sostenibilidad, el propósito de este estudio es analizar los efectos de los dobles techos, que contienen tecnologías de conversión del espectro solar (LSC), en el desarrollo de enfermedades fúngicas en los principales cultivos hortícolas de los invernaderos mediterráneos.

2. Material y Métodos

2.1. Invernaderos ensayados

Este ensayo se realizó en la Finca experimental UAL-ANECOOP, en dos invernaderos multitúnel, los cuales tenían cuatro sectores aislados separados por láminas de polietileno, constituyendo cuatro sectores aislados de similares características en cada invernadero: el Invernadero 1 (*G1*) tenía dos sectores con plástico estándar utilizado como doble techo y otros dos sectores con plástico foto conversor experimental utilizado como doble techo *C1*; El invernadero 2 (*G2*) también tenía dos sectores con plástico estándar utilizado como doble techo y otros dos sectores con otro plástico foto conversor experimental utilizado como doble techo *C2*. En el invernadero experimental *G1* se utilizaron las superficies de ventilación cenital y lateral, mientras que en el invernadero *G2* solo se utilizó ventilación cenital. En la Figura II. 1 se observa la distribución del ensayo.

En cada invernadero se establecieron cuatro sectores: los sectores centrales tenían la misma superficie de ventilación, en estos dos sectores centrales uno presentaba el plástico LSC y el otro el plástico estándar utilizado como doble techo (Invernadero 1; *G1*: *C1* vs *St*; e Invernadero 2; *G2*: *C2* vs *St*) (Figura II. 1).

Para analizar el posible efecto de los dobles techos en plantas con estrés hídrico, se aplicaron dos dosis de riego diferentes: (i) en la zona Norte de los invernaderos (Riego estándar, con goteros de 3 l/h y un riego máximo de 50 minutos/día); (ii) en la zona Sur (80% respecto al Estándar).

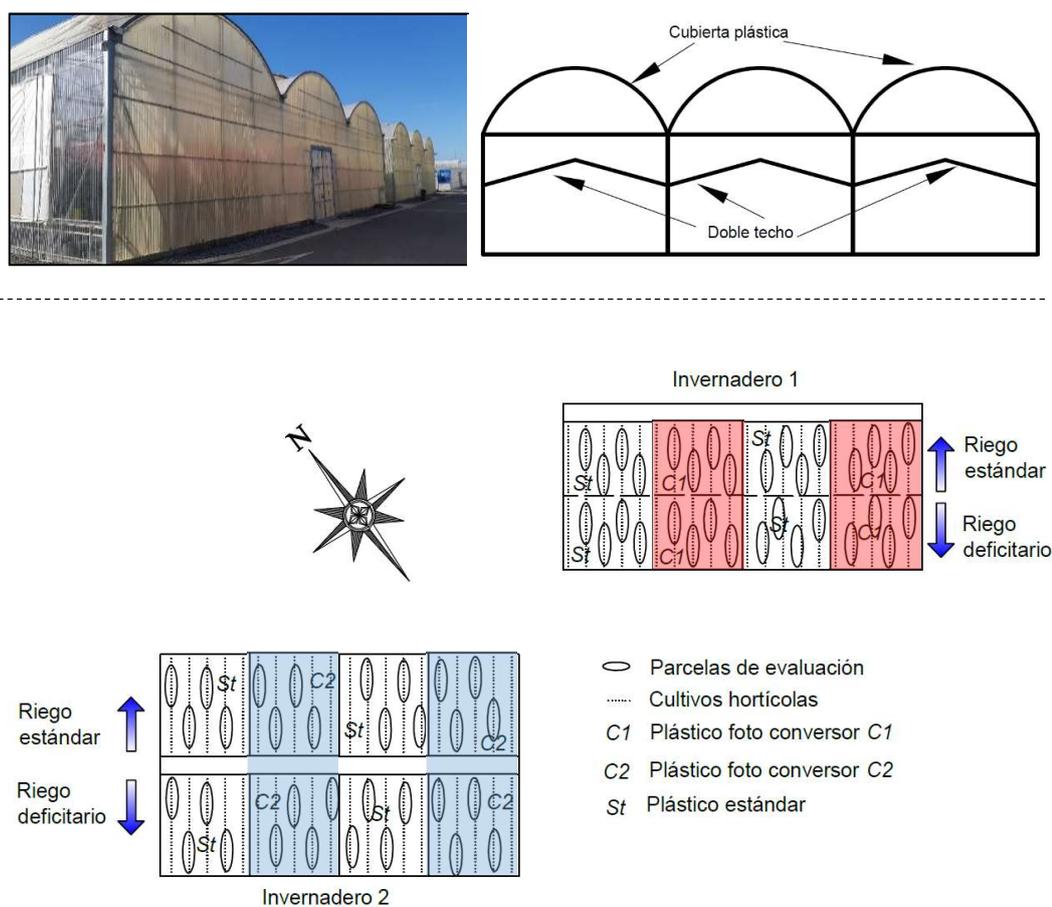


Figura II. 1. Instalación del doble techo en los invernaderos, distribución del ensayo, parcelas de evaluación y dotaciones de riego.

2.2. Cultivos

El estudio se realizó en cuatro ciclos diferentes de cultivo. Dos ciclos de pepino de otoño invierno (07/09/2020 - 02/01/2021, y 05/09/2021 - 02/01/2022), un ciclo de tomate de primavera verano (07/02/2021 - 15/07/2021) y otro ciclo de pimiento de primavera verano (20/02/2022 - 29/07/2022). Todos los cultivos se desarrollaron sobre un sustrato de fibra de coco con riego por goteo, con una densidad de siembra de 1 planta por metro cuadrado, en todos los casos e invernaderos.

2.3. Evaluación de las diferentes enfermedades en los cultivos

Para la evaluación de las diferentes enfermedades se siguieron las normativas EPPO: EPPO PP 1/181 (Realización de informes de ensayos de evaluación y eficacia), EPPO PP 1/152 (Diseño y análisis de ensayos de evaluación y eficacia), EPPO PP 1/57 (Oídio en cucurbitáceas), EPPO PP 1/65 (Mildiús de la lechuga y otras hortalizas) EPPO 1/263 (*Alternaria*

solani y *Alternaria alternata* sobre patata y tomate), EPPO 1/135 (Evaluación de fitotoxicidad) y EPPO 1/121 (Manchas en hojas de vegetales).

2.4. Análisis estadístico

Se analizaron 50 hojas en cada una de las parcelas de evaluación, que se correspondían con una repetición. Estudiando en todos los casos analizados 4 repeticiones, para cada zona afectada por diferentes sistemas de control climático y riego.

El análisis estadístico de los datos se realizó con el software Statgraphics Centurion v.19 (Manugistics Inc., Rockville, MD, EE. UU.), utilizando un análisis de varianza (considerado significativo si el valor de p es $\leq 0,05$), comparando los valores medios con el procedimiento de mínima diferencia significativa de Fisher (LSD).

3. Resultados

El oídio apareció en todos los ciclos estudiados, siendo la enfermedad principal en este trabajo. La incidencia de esta enfermedad se desarrolla de manera diferente en los dos invernaderos estudiados debido a la diferente ventilación de las estructuras, pero también se ve afectada dentro de cada invernadero individual por las diferentes dotaciones de riego y por las diferentes áreas cubiertas por los dobles techos. El oídio apareció de forma natural en el cultivo, como es habitual en esta zona, esta enfermedad es endémica en la zona, provocadas por los patógenos *S. fuliginea* para los ciclos de las cucurbitáceas y *L. taurica*, para las solanáceas (tomate y pimiento).

El mildiús y el tizón del tallo gomoso aparecieron solo en los ciclos de pepino en ambos ciclos y en los dos invernaderos estudiados. El mildiús fue causado por el patógeno *P. cubensis* y el tizón del tallo gomoso por el patógeno *D. bryoniae*.

El tizón temprano solo apareció en el cultivo de tomate en ambos invernaderos, y fue causado por el patógeno *A. solani*.

El análisis que se presenta a continuación se realizó en las partes centrales de los dos invernaderos, evitando el efecto de borde y comparando áreas aisladas de los invernaderos con el mismo nivel de ventilación dentro de cada uno de los invernaderos, diferenciándose únicamente en los materiales utilizados como doble techo. Los invernaderos G1 y G2 tienen

diferente ventilación, por lo que fue posible observar diferencias en el nivel de desarrollo de las diferentes enfermedades, correlacionándolas con la ventilación.

3.1. Ciclos de pepino

3.1.1. Oídio en cucurbitáceas

Durante los dos ciclos de cultivo de pepino se observó un menor desarrollo de oídio bajo los dobles techos que presentaban tecnologías de foto conversión frente a los plásticos estándar.

En la Figura II. 2 podemos observar la evolución en el tiempo del oídio en pepino en el año 2021, en el invernadero 1 G1, que si tenía ventilación lateral.

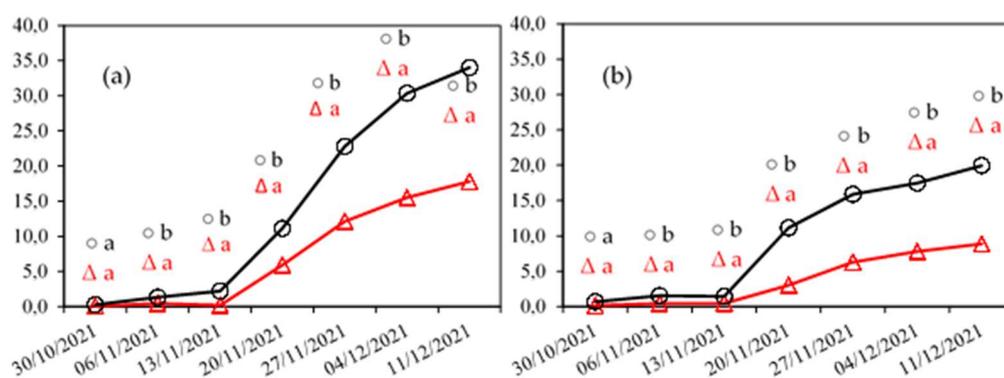


Figura II. 2. Evolución del porcentaje de infección de oídio en el ciclo de pepino 2021 en G1: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C1) (Δ); Sector con doble techo de plástico estándar (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (p = 0,95).

Tanto en el ciclo de 2020 como en el de 2021 oídio tuvo más dificultades para desarrollarse sobre el cultivo que estaba debajo del doble techo con plásticos fotos conversores. En la Figura II. 2 observamos reducciones en la infección de oídio en hoja en torno al 60%, cuando se alcanzan porcentajes de infección por encima del 5%.

Las diferencias estadísticas entre los porcentajes de infección de oídio fueron más marcadas en los casos en que se alcanzaron niveles elevados de enfermedad. Con niveles excepcionalmente bajos de enfermedad por debajo del 3 por ciento, las diferencias no eran claras, aunque estos bajos niveles de enfermedad tampoco son preocupantes para el productor.

En la Figura II. 3 observamos la evolución del oídio en el invernadero G2, sin ventilación lateral.

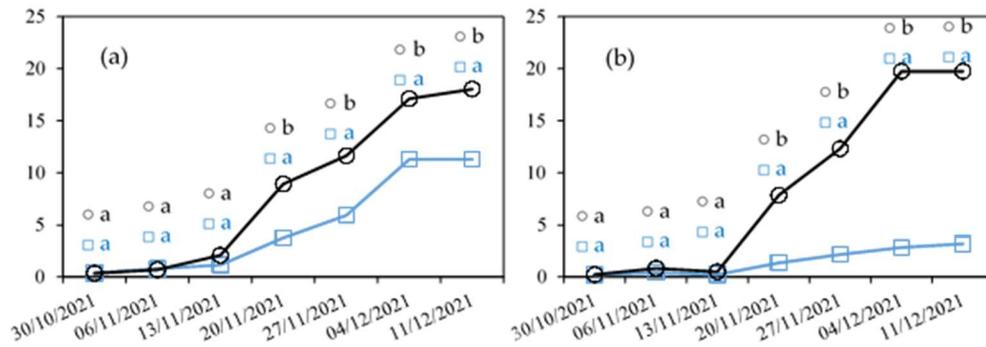


Figura II. 3. Evolución del porcentaje de infección de oídio en el ciclo de pepino 2021 en G2: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C2) (□); Sector con doble techo de plástico estándar (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

Al igual que en el caso anterior, en el invernadero G2 el uso de plásticos foto conversores en el doble techo redujo la infección de oídio sobre el cultivo. Según las zonas de estudio se consiguieron unas reducciones entre el 40 % y el 80 % del nivel de enfermedad.

Se observó, que cuanto mayor nivel de ventilación lateral se alcanzaban tasas más altas de presencia de oídio sobre los cultivos. Así si observamos las Figuras II. 2 y II. 3, observamos valores más altos en el invernadero que presenta ventilación lateral frente al que no. Igualmente si observamos el trabajo anterior, con una ventilación lateral mucho más alta, también observamos como en el invernadero se alcanzan porcentajes de infección de oídio mayores.

En este caso las diferencias entre zonas con dotación de riego diferentes no son tan claras como en los estudios anteriores, se observa la misma tendencia, pero sin diferencias claras.

3.1.2. Mildiús en cucurbitáceas

En el estudio anterior se describió como el uso de doble techo redujo la presencia de mildiús sobre el cultivo de manera drástica. En este trabajo todas las parcelas estudiadas presentaban doubles techos, por lo que los niveles de mildiús encontrados sobre el cultivo fueron realmente bajos, con incidencias inferiores al 3 por ciento de infección de daño en hoja, y no se observaron diferencias claras entre las diferentes zonas de estudio.

En las Figuras II. 4 y II. 5 observamos que no existen diferencias claras por el uso de plásticos foto conversores en los doubles techos, ya que el

uso de dobles techos por si solo reduce de manera grave el desarrollo de mildiús sobre pepino.

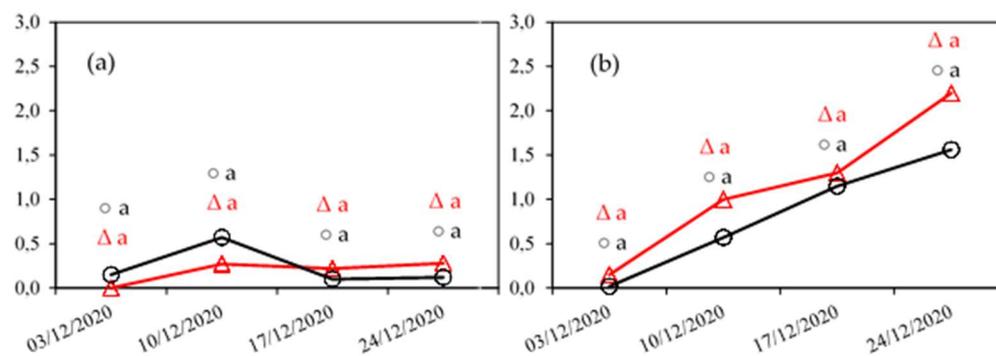


Figura II. 4. Evolución del porcentaje de infección de mildiús en el ciclo de pepino 2020 en G1: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C1) (Δ); Sector con doble techo de plástico estándar (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

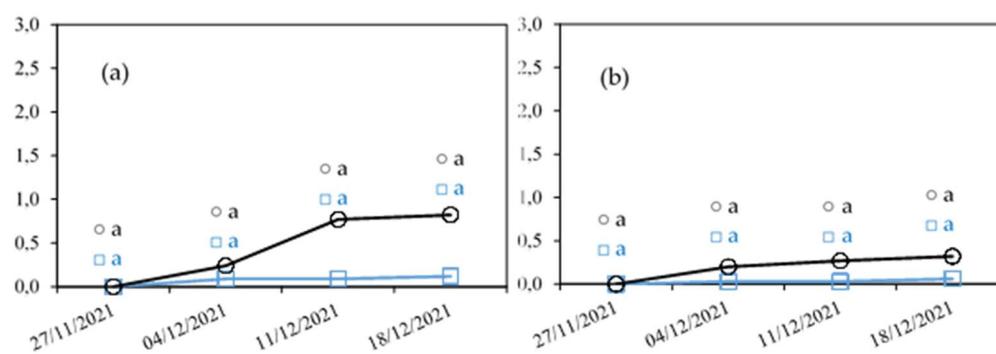


Figura II. 5. Evolución del porcentaje de infección de mildiús en el ciclo de pepino 2021 en G2: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C2) (□); Sector con doble techo de plástico estándar (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

En este caso tampoco se observaron las diferencias entre las zonas con diferentes dotaciones de riego.

3.1.3. Tizón del tallo gomoso en cucurbitáceas

En 2020, la presencia del tizón del tallo gomoso sobre el cultivo de pepino fue baja, menos del 3 por ciento. En 2021 se obtuvieron mayores niveles de infección de tizón del tallo gomoso, lo que facilitó encontrar diferencias estadísticas entre las diferentes zonas de estudio.

En las Figuras II. 6 y II. 7 observamos la evolución que tuvo la enfermedad en el segundo ciclo de pepino en 2021. En la Figura II. 6 con un nivel de porcentaje de infección por debajo del 5 por ciento,

observamos la tendencia que se mostró para otras enfermedades, menor desarrollo de la enfermedad bajo los plásticos foto conversores.

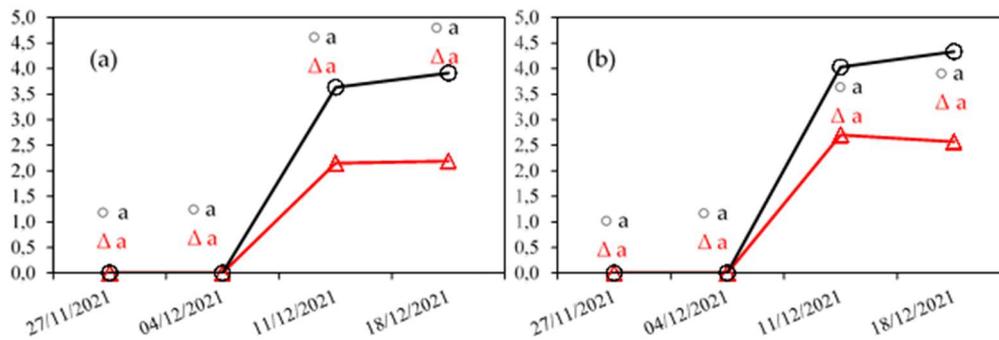


Figura II. 6. Evolución del porcentaje de infección del tizón del tallo gomoso en el ciclo de pepino 2021 en G1: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C1) (Δ); Sector con doble techo de plástico estándar (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

En la Figura II. 7, ya con un porcentaje de infección más elevado se observan las diferencias estadísticas entre las zonas cubiertas con los plásticos foto conversores y el estándar.

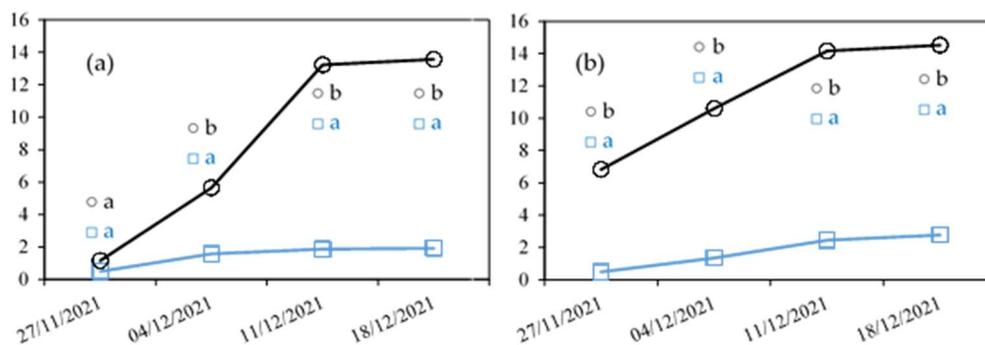


Figura II. 7. Evolución del porcentaje de infección del tizón del tallo gomoso en el ciclo de pepino 2021 en G2: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C2) (□); Sector con doble techo de plástico estándar (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

Además de la influencia de los dobles techos y sus materiales foto conversores, podemos observar cómo influye la ventilación en el desarrollo de la enfermedad. Así, en el invernadero G1, que tiene ventilación lateral se observó cómo se alcanzó un menor desarrollo de la enfermedad, no superando el 5% en ninguna de las parcelas evaluadas. Mientras que en el invernadero G2, sin ventilación lateral, se alcanzan porcentajes de infección en torno al 15 % en algunas parcelas. Aquí se

observó un claro ejemplo de disminución de la enfermedad manejando las superficies de ventilación natural.

3.2. Ciclo de tomate

3.2.1. Oídio en tomate

En el caso de las solanáceas, tanto del tomate como del pimiento, el oídio también fue nuestra principal enfermedad y la que alcanzó un mayor grado de desarrollo, en este caso fue causada por el patógeno *L. taurica*. En las Figuras II. 8 y II. 9 observamos al final de las evaluaciones tendencias iguales a las observadas para los ciclos del pepino. Mayor desarrollo de la enfermedad bajo los dobles techos con plásticos estándar, en la Figura II. 8, también se observó mayor desarrollo de la enfermedad en las zonas norte.

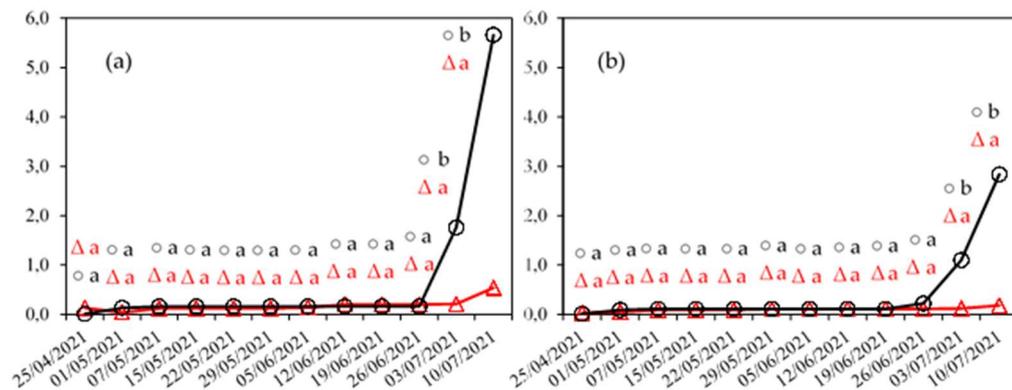


Figura II. 8. Evolución del porcentaje de infección de oídio en el ciclo de tomate 2021 en G1: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C1) (Δ); Sector con doble techo de plástico estándar (\circ). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

Hasta las últimas evaluaciones no se observaron diferencias claras entre las zonas de estudio, ni se alcanzaron valores destacados de porcentaje de infección, debido a que en este ciclo se desarrolló primero sobre el cultivo el tizón temprano, ya que las condiciones ambientales exteriores a los invernaderos, debido fundamentalmente a las precipitaciones, favorecieron su desarrollo por delante del oídio.

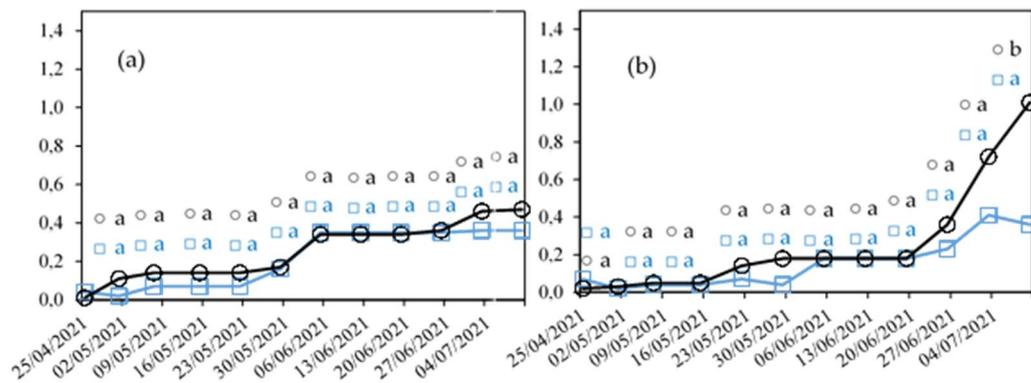


Figura II. 9. Evolución del porcentaje de infección de oídio en el ciclo de tomate 2021 en G2: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C2) (□); Sector con doble techo de plástico estándar (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

3.2.2. Tizón temprano en tomate

El tizón temprano apareció debido a una serie de lluvias inusuales en esta zona durante el período de estudio. En la Figura II. 10 Norte la enfermedad se comportó como el resto de las enfermedades estudiadas bajo el doble techo, pero en la zona Sur se comportó de manera contraria, mientras que en el invernadero G2 no se observaron diferencias para esta enfermedad según las zonas estudiadas.

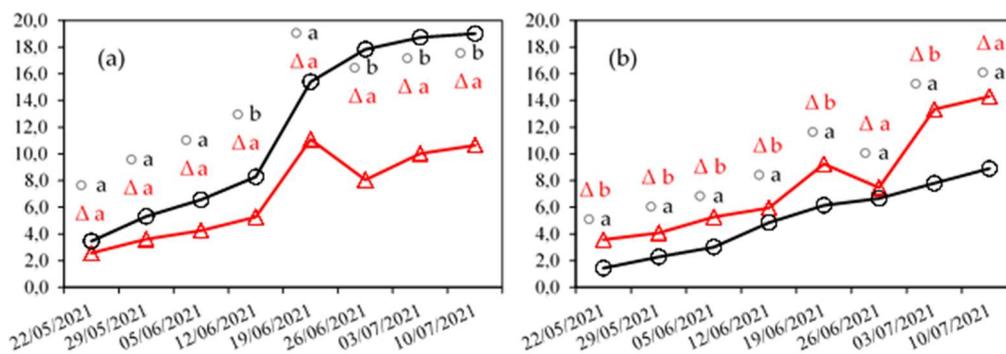


Figura II. 10. Evolución del porcentaje de infección de tizón temprano en el ciclo de tomate 2021 en G1: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C1) (Δ); Sector con doble techo de plástico estándar (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

El invernadero G2 mostró un nivel más bajo de enfermedad que el G1 para el tizón temprano, siendo el G2 el invernadero más aislado de las condiciones climáticas exteriores ya que tiene una tasa de ventilación más baja que el G1.

3.3. Ciclo de pimiento

3.3.1. Oídio en pimiento

El oídio fue la única enfermedad fúngica de cierta importancia que apareció en el ciclo de pimiento, alcanzó porcentajes de infección notablemente elevados en el invernadero *G1*, provocando daños severos al cultivo y precipitando su fin. El daño en el invernadero *G2* fue menor, aunque se alcanzó un porcentaje de infección entre un 4 y un 8 por ciento, según la zona de estudio.

En la Figura II. 11 se observan claras diferencias estadísticas desde el inicio de las evaluaciones, encontrando siempre mayor desarrollo de la enfermedad en las áreas cubiertas por los plásticos estándar

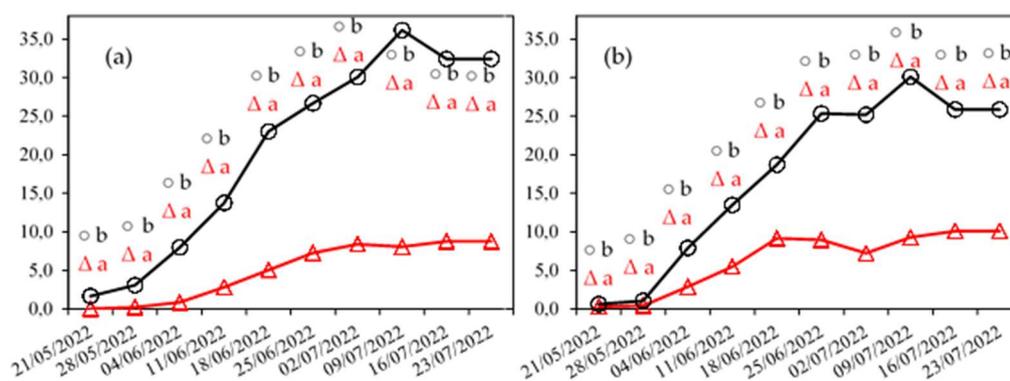


Figura II. 11. Evolución del porcentaje de infección de oídio en el ciclo de pimiento 2022 en *G1*: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (*C1*) (Δ); Sector con doble techo de plástico estándar (\circ). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

En la comparación entre los dos invernaderos, volvemos a observar que hubo diferencias en el porcentaje de infección alcanzado en cada invernadero, en función de la ventilación natural. En este caso el invernadero sin ventilación lateral desarrollo menor nivel de infección de oídio. Mostrando como la ventilación puede ser una herramienta muy valiosa para el control de las enfermedades fúngicas. Podemos observar los diferentes grados de infección de oídio sobre el cultivo entre las Figuras II. 11 y la II. 12.

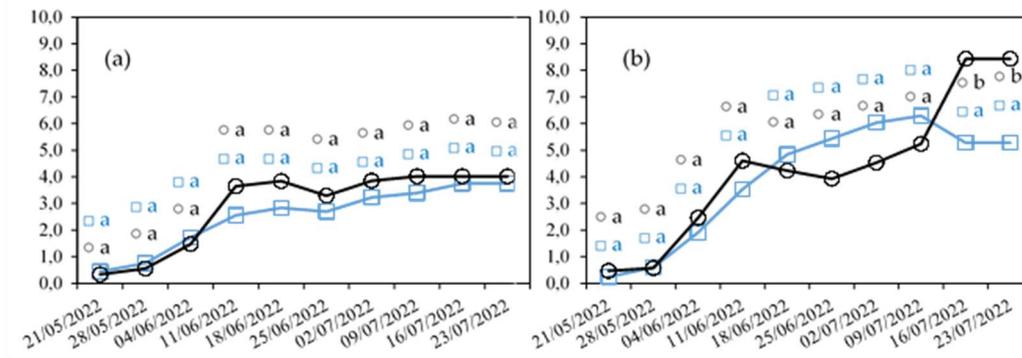


Figura II. 12. Evolución del porcentaje de infección de oídio en el ciclo de pimiento 2022 en G2: Riego normal (a) y riego deficitario (b). Sector con doble techo foto conversor (C2) (□); Sector con doble techo de plástico estándar (○). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,95$).

En la Figura II. 12 observamos que con niveles bajos de infección es más difícil encontrar diferencias entre las zonas estudiadas.

En el caso del pimiento, no se observaron diferencias claras al comparar las zonas Norte y Sur con diferentes asignaciones de riego.

4. Conclusiones

El uso de plásticos con características foto convertoras en los dobles techos de los invernaderos redujo el desarrollo de las enfermedades fúngicas analizadas: oídio (*S. fuliginea* y *L. taurica*), tizón del tallo gomoso (*D. bryoniae*).

La tecnología de foto conversión no mostró efectos claros contra el tizón temprano y el mildiús. El uso de doble techo actuó más drásticamente contra el mildiús que la tecnología de foto conversión, por lo que los efectos de la tecnología de foto conversión quedaron enmascarados debido a la drástica disminución del agua libre en el cultivo. El uso de doble techo en invernadero redujo significativamente el porcentaje de infección y el desarrollo de esporas de *P. cubensis*.

El oídio fue la enfermedad que mejor se desarrolló en esta zona, la que mejor se adapta a las condiciones locales. Las condiciones de luz y ambiente bajo la película de foto conversión, utilizada como doble techo, disminuyeron la presencia de oídio en el cultivo en comparación con el plástico estándar utilizado como doble techo.

La ventilación en el invernadero tuvo una influencia importante en el desarrollo de todas las enfermedades fúngicas estudiadas. El manejo de

la ventilación fue una herramienta útil para reducir el efecto de las enfermedades fúngicas en los cultivos.

Las diferentes cantidades de riego afectan el desarrollo de enfermedades fúngicas en los cultivos.

Estas estructuras de bajo coste, que gestionan las condiciones climáticas dentro de los invernaderos, podrían ayudar en el control o reducción de los niveles de estas enfermedades, evitando la aparición de resistencias a, las cada vez menos, sustancias activas permitidas contra el control de enfermedades fúngicas en los cultivos hortícolas europeos, además de reducir la resistencia a los principios activos utilizados para el control de enfermedades fúngicas, con un menor uso de los mismos y evitando una excesiva repetición en su aplicación.

Estas estructuras de bajo costo que no necesitan insumos energéticos mejoran la sostenibilidad de los cultivos protegidos.

7. Conclusiones

En la presente tesis se ha estudiado el desarrollo de diferentes enfermedades fúngicas, sobre algunos de los principales cultivos hortícolas protegidos de la zona de Almería. El estudio de estas enfermedades se asoció a diferentes técnicas agronómicas, que influyen en el manejo de las condiciones climáticas en el interior de los invernaderos, observando cómo estas técnicas pasivas de control climático, influían sobre los estreses bióticos relacionados con diferentes enfermedades fúngicas. Los resultados obtenidos muestran claramente, que las técnicas de control climático pasivo influyen sobre la presencia y desarrollo de las enfermedades sobre los cultivos, y que el manejo adecuado del clima en el interior del invernadero, podría ayudar en la gestión de enfermedades fúngicas, siendo una herramienta más a mano de los productores. Estas técnicas pasivas, que no necesitan aportes energéticos, harían la producción de hortícolas protegidas aún más sostenible, pudiendo disminuir el uso de fungicidas, cuyo abuso puede generar problemas de salud, ambientales y de sostenibilidad.

Esta tesis doctoral se presenta por la modalidad de compendio de publicaciones. Los trabajos mostrados en esta tesis se llevaron a cabo entre 2020 y 2023, dando como resultado las publicaciones expuestas en los apartados 2, 3 y 4, y generando dos posibles publicaciones futuras expuestas en los apartados 5 y 6.

7.1. Publicación científica 1: Efecto de diferentes sustratos, y riego con diferentes concentraciones salinas, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero tipo Almería.

En esta publicación se estudió la influencia del riego, su concentración salina y el tipo de sustratos regados, sobre dos enfermedades fúngicas, que atacaron a un cultivo de tomate: una enfermedad de suelo debida al patógeno *F. oxysporum f. sp. radicis-lycopersici*, y otra enfermedad aérea, debida al patógeno *L. taurica*. Ambas enfermedades están muy extendidas en la zona y generan numerosos problemas a los productores.

Los resultados obtenidos mostraron que las plantas sembradas en el sustrato de fibra de coco, presentaron mayor susceptibilidad a ambas enfermedades, especialmente a la pudrición de la corona y raíz del

tomate, donde los cultivos de tomate en fibra de coco sufrieron graves pérdidas.

En el caso de la composición de las aguas de riego, se observó que una mayor concentración de fertilizantes, en la solución nutritiva de riego, favorecía el desarrollo de oídio. Por otro lado, también se observó que una mayor concentración de sales en el agua de riego, principalmente NaCl, Ca²⁺ y Mg²⁺, sales que se encuentran en abundancia en el agua de los pozos de la zona, disminuye la incidencia de oídio sobre el cultivo.

Ambas enfermedades produjeron una reducción en la calidad de los cultivos, afectando de forma significativa al rendimiento obtenido en la cosecha de tomate. Causando una mayor cantidad de frutos no comerciales, en las zonas donde la incidencia de las enfermedades estudiadas fue mayor.

Los estreses tanto bióticos como abióticos que afectaron a las plantas en este ensayo, incrementaron los grados Brix ° de los frutos de tomate.

7.2. Publicación científica 2: Influencia de la difusividad y transmitancia de un plástico de cubierta de invernadero sobre el desarrollo de enfermedades fúngicas en un cultivo de pepino

En esta publicación se estudió el efecto de las cubiertas plásticas de invernadero, con capacidades ópticas diferentes, ejercieron sobre el desarrollo de enfermedades en dos ciclos de pepino.

La mayor transmisividad a la radiación PAR, que presentó el plástico experimental, redujo la influencia de las enfermedades estudiadas (oídio, mildiús y tizón del tallo gomoso) sobre los dos ciclos de cultivo de pepino.

La Oidiopsis fue la enfermedad que más daño causó sobre los dos ciclos de cultivo, en ambos casos provocó el final prematuro de los cultivos de pepino. Sin embargo, fue la enfermedad a la que más le afectó el cambio de las propiedades ópticas provocadas por los plásticos, siendo la enfermedad que más vio reducida su actividad debido al uso del plástico experimental.

La producción comercial, en ambos ciclos de pepino, fue superior en los cultivos desarrollados bajo la cubierta plástica experimental, con un incremento de producción del 4,9 % en el primer ciclo y un 14,7 % en el segundo ciclo. Aunque no se encontraron diferencias de calidad entre los frutos comerciales obtenidos bajo el plástico experimental y el comercial, obteniendo valores similares de peso, longitud, diámetro y sólidos solubles por fruto.

7.3. Publicación científica 3: Efecto de las cubiertas plásticas en el desarrollo de enfermedades fúngicas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y pimiento (*Capsicum annuum* L.) en invernaderos Mediterráneos.

En este caso la comparativa de cubiertas plásticas se realizó en dos ciclos de solanáceas, uno de tomate y otro de pimiento, obteniendo resultados similares a los obtenidos en la publicación científica anterior, lo que refuerza los resultados obtenidos, sobre la influencia de los sistemas de control climático pasivos, estudiados en esta tesis, en las enfermedades estudiadas.

El oídio vio disminuida su actividad, en ambos ciclos de cultivo, en las plantas que se desarrollaron bajo la cubierta plástica experimental, diferenciándose estadísticamente del plástico estándar. En el caso del tizón temprano también se observó un comportamiento similar, aunque no tan claro, en el desarrollo del tizón temprano, encontrando menos problemas causados por esta enfermedad en las zonas cubiertas por el plástico experimental.

Al igual que ocurrió en el estudio previo, bajo el plástico experimental, se obtuvo una mayor cantidad de frutos comerciales. En el ciclo de tomate se consiguió un aumento de la producción comercial de 4,2 %, mientras que en el ciclo de pepino se obtuvo un incremento del 3,1 %. Al igual que en el estudio previo, no se observaron diferencias estadísticas en la calidad de los frutos comerciales analizados. Obteniendo valores similares de peso, diámetro, longitud, longitud de raquis, espesor y firmeza de la pared del fruto, contenido de sólidos solubles, materia seca y color de los frutos, en las diferentes áreas de estudio.

7.4. Estudio derivado 1: Influencia del uso de doble techo, combinado con el incremento de superficie de ventilación, en el desarrollo de enfermedades fúngicas en un invernadero multitúnel mediterráneo.

En este trabajo se analizaron los efectos de otra técnica de control climático pasivo sobre diferentes enfermedades fúngicas, que atacan a los principales cultivos hortícolas de la zona de Almería. Se estudiaron dos ciclos de otoño invierno de pepino, otro de primavera verano de tomate y otro de primavera verano de pimiento. Estudiando las siguientes enfermedades, oídio (powdery mildew), mildiús (downy mildew), tizón del tallo gomoso (gummy stem blight) y tizón temprano (early blight).

El uso de dobles techos en invernadero redujo el nivel de ataque de las enfermedades estudiadas en todos los ciclos de cultivo observados. Las condiciones de luminosidad y ambientales afectaron especialmente al oídio reduciendo su actividad. El mildiús fue la enfermedad que más vio reducida su presencia, bajo las zonas cubiertas con doble techo, debido a la drástica reducción de agua libre sobre el cultivo, que se genera por la condensación en la cubierta del invernadero. El uso de doble techo casi elimina la presencia de mildiús en los ciclos estudiados. El tizón temprano fue la enfermedad menos afectada por el uso de dobles techos, aunque mostró una tendencia a reducir su actividad, bajo los dobles techos, al igual que las otras enfermedades presentes en este estudio.

La ventilación natural en el invernadero estudiado mostró ser fundamental para el manejo de las enfermedades fúngicas, observando la capacidad de un manejo adecuado de la ventilación para la reducción de estas.

Las zonas de estudio que presentaban un mayor nivel de riego también presentaron una mayor actividad de las enfermedades estudiadas, en todos los casos menos para el tizón temprano, donde la dotación de riego no afectó a su desarrollo.

7.5. Estudio derivado 2: Manejo de enfermedades fúngicas en invernaderos Mediterráneos usando dobles techos foto conversores en combinación con ventilación natural.

En este trabajo se combinaron las técnicas del doble techo con el uso de plásticos foto conversores. Se estudiaron dos ciclos de otoño-invierno de pepino, otro de primavera-verano de tomate y otro de primavera-verano de pimiento. Estudiando las siguientes enfermedades, oídio (powdery mildew), mildiús (downy mildew), tizón gomoso del tallo (gummy stem blight) y tizón temprano (early blight), al igual que en el estudio anterior.

La combinación de estas técnicas agronómicas redujo la incidencia de las enfermedades fúngicas estudiadas (oídio y tizón del tallo gomoso) sobre los cultivos. El tizón temprano no se vio afectada por el uso de dobles techos foto conversores. En el caso del mildiús el uso de los dobles techos redujo su actividad sobre los cultivos casi totalmente, como observamos en el trabajo anterior, por lo que la combinación de ambas técnicas no produjo ningún efecto observable sobre la enfermedad, al no haber en este trabajo ninguna zona de estudio que no tuviese doble techo.

La combinación de estas dos técnicas de cultivo afectó en mayor medida al oídio, reduciendo su actividad.

La ventilación natural, volvió a ser una herramienta fundamental para el manejo de enfermedades, mostrando su capacidad de favorecer el desarrollo del oídio. Así en el invernadero con menor ventilación estudiado, en los ciclos de tomate y pimiento, la presencia de oídio sobre los cultivos fue muy baja.

Al igual que en el estudio anterior las zonas con mayor dotación de riego mostraron mayor nivel de desarrollo de las enfermedades estudiadas, menos para el caso del tizón temprano.

7.6. Trabajos futuros

El uso de técnicas de control climático de bajo coste, que modifican las condiciones climáticas dentro de los invernaderos, podrían ayudar en el control o reducción de los niveles de las enfermedades estudiadas, permitiendo un control de enfermedades fúngicas más sostenible en los cultivos hortícolas, además de reducir la resistencia a los principios activos utilizados para el control de enfermedades fúngicas, con un menor uso de estos y evitando una excesiva repetición en su aplicación.

Estas estructuras de bajo coste, que no necesitan insumos energéticos mejoran la sostenibilidad de los cultivos protegidos.

Estas líneas de investigación en combinación con los datos climáticos obtenidos durante estos trabajos, abren diferentes posibilidades de estudio. En estudios futuros de este grupo de investigación, está el objetivo de reducir o eliminar la técnica de blanqueo, que disminuye la radiación PAR que llega al cultivo, las técnicas que se usen para lograr este objetivo, también afectarán al desarrollo de las enfermedades fúngicas en algún modo.

El uso de la información climática y el desarrollo de las enfermedades fúngicas, nos permitiría la obtención de modelos matemáticos que ayuden a predecir el momento de aparición de estas enfermedades, y si fuera posible reducir sus efectos sobre los cultivos, manejando el clima en el interior de los invernaderos.

Otro de los usos que se podría dar a la combinación de los datos climáticos con el desarrollo de las enfermedades fúngicas, a partir de modelos matemáticos, sería predecir el momento óptimo de aplicación de cualquier tipo de producto fitosanitario, para maximizar su efecto de control sobre la enfermedad, y evitar su uso excesivo, evitando los problemas conocidos y mencionados anteriormente en esta tesis, por el mal uso de estos productos.

8. Bibliografía

Abak, K., Başçetinçelik, A., Baytorun, N., Altuntas, Ö., Öztürk, H. H., 1994. Influence of double plastic cover and thermal screen on greenhouse temperature, yield and quality of tomato. *Acta Horticulturae*, 366, 149–154. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.366.17>

Ahamed, Md. S., Guo, H., Tanino, K., 2019. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, 178, 9–33. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017>

Akrami, M., Salah, A. H., Javadi, A. A., Fath, H. E. S., Hassanein, M. J., Farmani, R., Dibaj, M., Negm, A., 2020. Towards a sustainable greenhouse: Review of trends and emerging practices in analysing greenhouse ventilation requirements to sustain maximum agricultural yield. *Sustainability* 2020, 12, 2794. <https://doi.org/10.3390/su12072794>

Arny, C. J., Rowe, R. C., 1991. Effects of temperature and duration of surface wetness on spore production and infection of cucumbers by *Didymella bryoniae* *Phytopathology*, 81 (1991), pp. 206-209 https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1991Articles/Phyto81n02_206.PDF (accessed on 06 April 2023)

Baptista, F. J. F., 2007. Modelling the Climate in Unheated Tomato Greenhouses and Predicting *Botrytis Cinerea* Infection; Ph.D. Thesis, Universidade de Evora: Evora, Portugal, 2007.

Baptista, F. J. F., Bailey, B. J., Meneses J. F., 2012. “Effect of Nocturnal Ventilation on the Occurrence of *Botrytis Cinerea* in Mediterranean Unheated Tomato Greenhouses.” *Crop protection* 32 (2012): 144–149. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.11.005>

Baudoin, W., Nersisyan, A., Shamilov, A., Hodder, A., Gutierrez, D., Pascale, S. D. E., Nicola, S., Chairperson, V., Gruda, N., Urban, L., 2017. Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Production in the South East European Countries; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2017; pp. 1–449, ISBN 978-92-5-109622-2. <https://www.fao.org/3/i3284e/i3284e.pdf> (accessed on 11 February 2023).

- Bessadat, N., Berruyer, R., Hamon, B., Kihal, M., Henni, D. E., Simoneau, P., Bataille-Simoneau, N., Benichou, S., 2016. *Alternaria* species associated with early blight epidemics on tomato and other Solanaceae crops in northwestern Algeria. *Eur. J. Plant Pathol.* 2016, 148, 181–197. <https://doi.org/10.1007/s10658-016-1081-9>
- Boulard, T., 2006. Greenhouse natural ventilation modelling: A survey of the different approaches. In *Proceedings of the International Symposium on Greenhouse Cooling 719*, Almeria, Spain, 24–27 April 2006; pp. 29–30. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.1>
- Brodersen, C. R., Vogelmann, T. C., Williams, W. E., Gorton, H. L., 2008. A new paradigm in leaf-level photosynthesis: direct and diffuse lights are not equal. *Plant. Cell Environ.* 2008, 31, 159–164, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01751.x>
- Can, C., Yucel, S., Korolev, N., Katan, T., 2010. First report of *Fusarium* crown and root rot of tomato caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* in Turkey. *Plant Pathol* 53(6):814–814. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2004.01087.x>
- Cañadas, J., Sánchez-Molina, J. A., Rodríguez, F., del Águila, I. M., 2017. Improving automatic climate control with decision support techniques to minimize disease effects in greenhouse tomatoes *Informat. Process. Agric.*, 4 (1) (2017), pp. 50-63, <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.12.002>
- Castilla, N., Montero, J. I., 2008. Environmental control and crop production in Mediterranean greenhouses. *Acta Hortic.* 797, 25–36. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.797.1>
- Castillo-Díaz, F. J., Belmonte-Ureña, L. J., Camacho-Ferre, F., Tello-Marquina, J. C., 2021. The Management of Agriculture Plastic Waste in the Framework of Circular Economy. Case of the Almeria Greenhouse (Spain). *International journal of environmental research and public health*, 18(22), 12042. <https://doi.org/10.3390/ijerph182212042>
- Cemek, B., Demir, Y., Uzun, S., 2005. Effects of Greenhouse Covers on Growth and Yield of Aubergine. *European journal of horticultural science* 70 (1), 16–22. Print. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.08.004>
- Cerkauskas, R. F., Buonassisi, A., 2003. First report of powdery mildew of greenhouse pepper caused by *Leveillula taurica* in British Columbia,

- Canada. Plant Dis. 2003, 87, 1151.
<https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.9.1151C>
- Chaerani, R., Voorrips, R. E., 2006. Tomato early blight (*Alternaria solani*): the pathogen, genetics, and breeding for resistance J. Gen. Plant Pathol., 72 (2006), pp. 335-347, <https://doi.org/10.1007/s10327-006-0299-3>
- Chantoiseau, E., Migeon, C., Chasseriaux, G., Bournet, P. E., 2016. Heat-pump dehumidifier as an efficient device to prevent condensation in horticultural greenhouses. Biosystems Engineering, 142, 27–41.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.011>
- Cohen, Y., Rubin, A. E., Galperin, M., Ploch, S., Runge, F., Thines M., 2014. Seed transmission of *Pseudoperonospora cubensis* PLoS ONE, 9 (2014), Article e109766 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109766>
- Costa, P. M., Pôças, I., Cunha, M., 2019. Modelling evapotranspiration of soilless cut roses “Red Naomi” based on climatic and crop predictors. Horticultural Science (Praha), 46(2), 107–114.
<https://doi.org/10.17221/147/2017-HORTSCI>
- Cuartero, J., Fernández-Muñoz, R., 1999. Tomato and salinity. Sci. Hortic. 1999, 78, 83–125. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00191-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00191-5)
- Davis, R. M., Paulus, A. O., 2014. Fusarium Crown and Root Rot. In J. B. Jones, T. A. Zitter, T. M. Momol & S. A. Miller (Eds.), Compendium of tomato diseases and pests (pages 25–27) (2nd Ed). St. Paul-MN: APS Press. <https://doi.org/10.2307/3760420>
- Del Castillo Múnera, J., Belayneh, B., Ritsvey, A., Koivunen, E. E., Lea-Cox, J., Swett, C. L., 2019. Enabling adaptation to water scarcity: Identifying and managing root disease risks associated with reducing irrigation inputs in greenhouse crop production – A case study in poinsettia. Agricultural Water Management, 226, 105737–.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105737>
- Desta, M., Yesuf, M., 2015. Efficacy and economics of fungicides and their application schedule for early blight (*Alternaria solani*) management and yield of tomato at South Tigray Ethiopia. J. Plant Pathol. Microbiol. 2015, 6, 1–6. <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000268>
- Edser, C., 2002. Light manipulating additives extend opportunities for agricultural plastic films Plastics, Additives and Compounding, 4 (2002), pp. 20-24. [https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(02\)80079-4](https://doi.org/10.1016/S1464-391X(02)80079-4)

Elad, Y., Messika, Y., Brand, M., David, D. R., Sztejnberg, A., 2007. Effect of colored shade nets on pepper powdery mildew (*Leveillula taurica*). *Phytoparasitica*, 35(3), 285–299. <https://doi.org/10.1007/BF02981163>

European and Mediterranean Plant Protection Organization <https://www.eppo.int> (accessed on 05 April 2023)

FAO, 2016. The state of food and agriculture: Climate change, Agriculture and Food Security. Reporte técnico, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <https://www.fao.org/3/i6030e/i6030e.pdf> (accessed on 11 April 2021)

Ferguson, G., 2009. Gummy stem blight of greenhouse cucumber. Factsheet. Ontario ministry of agriculture, food and rural affairs. Available from: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/09-051w.htm> (accessed on 06 March 2023)

Flowers, T. J., Troke, P. F., Yeo, A. R., 1977. The mechanisms of salt tolerance in 348 halophytes. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 1977, 28, 89–121. <https://doi.org/10.1515/biol-2018-0020>

Fondevilla, S., Rubiales, D., 2012. Powdery mildew control in pea. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 2012, 32, 401–409. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0033-1>

Foolad, M. R., Ntahimpera, N., Christ, B. J., Lin, G. Y., 2000. Comparison of field, greenhouse, and detached-leaflet evaluations of tomato germ plasm for early blight resistance *Plant Dis.*, 84 (2000), pp. 967-972, <https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.9.967>

Gonçalves, L. J., Tagliaferre, C., Castro Filho, M. N. D., Guimaraes, D. U. G., Rocha, F. A., 2019. Irrigameter use for estimating crop evapotranspiration in protected environment. *Caatinga*, 32(3), 778–785. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n322rc>

Granados, M. R., Bonachela, S., Hernández, J., López, J. C., Magán, J. J., 2017. Irrigation influence on the microclimate of a Mediterranean plastic greenhouse with black mulch and without crop. *Acta Horticulturae*, 1170, 759–764. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.96>

Granke, L. L., Morrice, J. J., Hausbeck, M. K., 2014. Relationships between airborne *Pseudoperonospora cubensis* sporangia, environmental conditions, and cucumber downy mildew severity. *Plant Dis* 98: 674–681. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-13-0567-RE>

- Gu, L., Baldocchi, D., Verma, S. B., Black, T. A., Vesala, T., Falge, E. M., 2002. Dowty, P.R. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2002, 107, ACL 2-1-ACL 2-23, <https://doi.org/10.1029/2001JD001242>
- Gupta, M. J., Chandra, P., 2002. Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. *Energy* 2002, 27, 777–794. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00030-0)
- Gusmini, G., Song, R., Wehner, T. C., 2017. Inheritance of resistance to gummy stem blight in watermelon. *HortScience* 2017, 52, 1477– 1482. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12123-17>
- Heidari, M. D., Omid, M., 2011. Energy use patterns and econometric models of major greenhouse vegetable productions in Iran. *Energy* 2011, 36, 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.048>
- Hemming, S., Kempkes, F., van der Braak, N., Dueck, T., Marissen, N., 2006. Greenhouse cooling by NIR-reflection. *Acta Horticulturae*. 719, 97-106. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.8>
- 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. *Biosyst. Eng.* 2017, 163, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.012>
- Horinouchi, H., Katsuyama, N., Taguchi, Y., Hyakumachi, M., 2008. Control of *Fusarium* crown and root rot of tomato in a soil system by combination of a plant growth-promoting fungus, *Fusarium equiseti*, and biodegradable pots. *Crop Prot* 27(3):859–864. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.08.009>
- Ilic, Z., Fallik, E., 2017. Light quality manipulation improves vegetable quality at harvest and postharvest: A review. *Environ. Exp. Bot.* 2017, 139, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.006>
- Islam, T., Rahman, M. M., Pandey, P., Boehme, M. H., Haesaert, G., 2020. Management of Fungal Diseases on Cucumber (*Cucumis sativus* L.) and Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Crops in Greenhouses Using *Bacillus subtilis*. In *Bacilli and Agrobiotechnology: Phytostimulation and Biocontrol* (pp. 1–28). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15175-1_1

- Itagaki, K., Shibuya, T., 2018. Differences in early hyphal development of *Podosphaera xanthii* on *Cucumis sativus* leaves acclimatized to high or low relative humidity. *Botany*, 2018, 96(1), 67–71. <https://doi.org/10.1139/cjb-2017-0159>
- Jarquín-Enríquez, L., Mercado-Silva, E. M., Maldonado, J. L., López-Baltazar, J., 2013. Lycopene content and color index of tomatoes are affected by the greenhouse cover, *Scientia Horticulturae*, Volume 155, 2013, Pages 43-48, ISSN 0304-4238, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.03.004>
- Jarvis, W. R., Gubler, W. D., Grove, G. G., 2002. Epidemiology of powdery mildews in agricultural pathosystems. In *The Powdery Mildews. A Comprehensive Treatise* ed. Belanger, R.R., Bushnell, W.R., Dik, A.J. and Carver, T.L.W. pp. 169–199. St Paul, MN, USA: APS Press. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20023170355> (accessed on 20 March 2023).
- Katan, T., Zamir, D., Sarfatti, M., Katan, J., 1991. Vegetative compatibility groups and subgroups in *Fusarium oxysporum f. sp. radicis-lycopersici*. *Phytopathology* 81: 255–262 <https://doi.org/10.1094/Phyto-81-255>
- Kim, J. T., Park, I. H., Oung, I. H., Yu, S. H., 2001. Crown and root rot of greenhouse tomato caused by *Fusarium oxysporum f. sp. Radicis lycopersici* in Korea. *Plant Pathol. J.* 2001, 17, 290–294. Available online: <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200111920848196> (accessed on 20 March 2022).
- Köhl, J., Gerlagh, M., Grit, G., 2000. Biocontrol of *Botrytis cinerea* by *Ulocladium atrum* in different production systems of cyclamen. *Plant Disease*, 84: 569-573. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.5.569>
- Kondratyev, K. Y., 1969. Radiation in the atmosphere. Academic Press, New York (1969). <https://www.sciencedirect.com/bookseries/international-geophysics/vol/12> (accessed on 29 March 2023).
- Körner, O., Challa, H., 2003. Process-based humidity control regime for greenhouse crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 39 (3): 173-192. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(03\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(03)00079-6)
- Kuswardhani, N., Soni, P. y Shivakoti, G. P., Mayo 2013. Comparative energy input output and financial analyses of greenhouse and open field

vegetable production in West Java, Indonesia. *Energy* 53, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.032>

Lage, D. A. C., Marouelli, W. A., Café-Filho, A. C., 2019. Management of powdery mildew and behaviour of late blight under different irrigation configurations in organic tomato, *Crop Protection*, Volume 125, 2019, 104886, ISSN 0261-2194, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104886>

Lamnatou, Chr., Chemisana, D., 2013. Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fluorescent solar concentrators, photo selective and other materials. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 27, 175–190. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.052>

Lebeda, A., Krátková, E., Sedláková, B., McCreight, J. D., Coffey, M. D., 2016. Cucurbit powdery mildews: methodology for objective determination and denomination of races. *Eur. J. Plant Pathol.* 144, 399–410. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0776-7>

Lievens, B., Rep, M., Thomma, B. P. H. J., 2008. Mini-review. Recent developments in the molecular discrimination of formae specialis of *Fusarium oxysporum*. *Pest Management Science* 64:781-788. <https://doi.org/10.1002/ps.1564>

Linden, P. F., Lane-Serff, G. F., Smeed, D. A., 1990. Emptying filling boxes: The fluid mechanics of natural ventilation. *J. Fluid Mech.*; 1990; 212, pp. 309-335. <https://dx.doi.org/10.1017/S0022112090001987>

López-Martínez, A., Molina-Aiz, F. D., Moreno-Teruel, M. d. I. A., Peña-Fernández A., Baptista F. J. F., Valera-Martínez, D. L., 2021. Low Tunnels Inside Mediterranean Greenhouses: Effects on Air/Soil Temperature and Humidity. *Agronomy* 11, 1973. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101973>

López-Martínez, A., Molina-Aiz, F. D., Valera-Martínez, D. L., López-Martínez, J., Peña-Fernández, A., Espinoza-Ramos, K., 2019. Application of Semi-Empirical Ventilation Models in a Mediterranean Greenhouse with Opposing Thermal and Wind Effects. Use of Non-Constant Cd (Pressure Drop Coefficient Through the Vents) and Cw (Wind Effect Coefficient). *Agronomy* (Basel), 9(11), 736–. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110736>

López-Martínez, A., Valera-Martínez, D. L., Molina-Aiz, F. D., Moreno-Teruel, M. Á., Peña-Fernández, A., Espinoza-Ramos, K. E., 2019. Analysis of the Effect of Concentrations of Four Whitening Products in Cover

Transmissivity of Mediterranean Greenhouses. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, 16, 958. <https://doi.org/10.3390/ijerph16060958>.

McGovern, R. J., 2015. Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Prot.* 2015; 73:78–92 <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.021>

Medina, D., Gomez, R., Guirado, E., 2009. Preliminary observations about Tommy Atkins production outdoors and under plastic greenhouse in southern mainland Spain. *Acta Horticulturae*, 820, 443–445. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2009.820.55>

Meena, M., Zehra, A., Dubey, M. K., Aamir, M., Gupta, V. K., Upadhyay, R. S., 2016. Comparative Evaluation of Biochemical Changes in Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Infected by *Alternaria alternata* and Its Toxic Metabolites (TeA, AOH, and AME). *Front. Plant Sci.* 2016, 7, 1408 <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01408>

Mistriotis, A., Arcidiacono, C., Picuno, P., Bot, G.P.A., Scarascia Mugnozza, G., 1997. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero-and low-wind-speeds. *Agric. For. Meteorol.*; 1997; 88, pp. 121-135. [https://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00045-2](https://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00045-2)

Mohamed, A., Hamza, A., Derbalah, A., 2016. Recent approaches for controlling downy mildew of cucumber under greenhouse conditions. *Plant Protect. Sci.*, 52: 1-9. <https://doi.org/10.17221/63/2015-PPS>

Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Álvarez, A. J., 2004. Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 125, Issues 1–2, 2004, Pages 33-51, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.03.009>.

Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Peña, A. A., Gil, J. A., López, A., 2009. A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry *Biosystems Engineering*. 2009 Oct;104(2):224-242. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.013>

Molot, P. M., Leroux, J. P., Diop-Bruckler, M., 1990. *Leveillula taurica* (Lév) Arn: cultures axéniques, biologie et spécificité parasitaire [*Leveillula taurica* (Lév) Arn: axenic cultures, biology and parasite specificity]. *Agronomie* 10(7):551-559. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885316> (accessed on 20 March 2022)

- Moore, J. P., Paul, N. D., Jacobson, R. J., 2006. A demonstration of the potential benefits of modification of light spectral quality in horticultural crops *Acta Horticulturae*, 711 (2006), pp. 309-314 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.42>
- Morales-Mazo I. I., Rodríguez-Burrezo, A., Jiménez-Pérez, M., Luna-Ruíz, J. J., San-Bautista, A., Fita, A., 2021. Novel sources of resistance to powdery mildew (*Leveillula taurica* (Lév.) Arnaud) in pepper. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(2), 12354–. <https://doi.org/10.15835/nbha49212354>
- Moreno Teruel, M. d. I. A., 2021. Contribución al conocimiento de la actividad fotosintética provocada por diversos sistemas de control climático en invernaderos Mediterráneos. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. España, 2021.
- Moreno-Teruel, M. d. I. A., Molina-Aiz, F. D., Peña-Fernández, A., López-Martínez, A., Valera-Martínez, D. L., 2021. The Effect of Diffuse Film Covers on Microclimate and Growth and Production of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in a Mediterranean Greenhouse. *Agronomy (Basel)*, 11(5), 860–. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050860>
- Murakami, K., Fukuoka, N., Noto, S., 2017. Improvement of greenhouse microenvironment and sweetness of melon (*Cucumis melo* L.) fruits by greenhouse shading with a new kind of near-infrared ray-cutting net in mid-summer. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 2017, 218, 1–7, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.02.011>
- Nam, M. H., Lee, W. K., Lee, S. S., Kim, N. G., Kim, H. G., 2005. Control efficacy of milk concentration against powdery mildew of strawberry. *Plant Pathol J* 21, 270–274. <https://doi.org/10.5423/PPJ.2005.21.3.270>
- Neufeld, K. N., Ojiambo, P. S., 2012. Interactive effects of temperature and leaf wetness duration on sporangia germination and infection of cucurbit hosts by *Pseudoperonospora cubensis*. *Plant Dis* 96: 345–353. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-11-0560>
- Nicolosi, G., Volpe, R., Messineo, A., 2017. An Innovative Adaptive Control System to Regulate Microclimatic Conditions in a Greenhouse. *Energies (Basel)*, 10(5), 722–. <https://doi.org/10.3390/en10050722>
- Ota, E., Nishimura, F., Mori, M., Tanaka, M., Kanto, T., Hosokawa, M., Osakabe, M., Satou, M., Takeshita, M., 2021. Up-regulation of pathogenesis-related genes in strawberry leaves treated with powdery

mildew-suppressing ultraviolet irradiation. *Plant Pathology*, 70(6), 1378–1387. <https://doi.org/10.1111/ppa.13384>

Ouazzani Chahidi, L., Fossa, M., Priarone, A., Mechaqrane, A., 2021. Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the Mediterranean climate a case study. *Appl. Energy* 2021, 282, 116156. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116156>.

Papadakis, G., Briassoulis, D., Mugnozsa, G. S., Vox, G., Feuilloley, P., Stoffers, J. A., 2000. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. *J. Agric. Eng. Res.* 2000, 77, 7–38. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0525>.

Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mungnozsa, 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*, Volume 77, Issue 1, 2000, Pages 7-38, ISSN 0021-8634, <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0525>

Parisi, M., Alioto, D., Tripodi, P., 2020. Overview of biotic stresses in pepper (*Capsicum spp.*): Sources of genetic resistance, molecular breeding and genomics. *International Journal of Molecular Sciences* 21(7):2587. <https://doi.org/10.3390/ijms21072587>

Pathak, R, Ergon, Å., Stensvand, A., Gislerød, H. R., Solhaug, K. A., Cadle-Davidson, L., Suthaparan, A., 2020. Functional Characterization of *Pseudoidium neolycopersici* Photolyase Reveals Mechanisms behind the Efficacy of Night time UV on Powdery Mildew Suppression. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1091–1091. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01091>

Pérez-García, A., Romero, D., Fernández-Ortuño, D., López-Ruiz, F., de Vicente, A., Torés, J. A., 2009. The Powdery Mildew Fungus *Podosphaera Fusca* (synonym *Podosphaera Xanthii*), a Constant Threat to Cucurbits. *Mol. Plant Pathol.* 10(2), 153–160. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00527.x>

Pérez-Neira, D., Soler-Montiel, M., Delgado-Cabeza, M., Reigada, A., 2018. Energy use and carbon footprint of the tomato production in heated multi-tunnel greenhouses in Almeria within an exporting agri-food system context. *Sci. Total Environ.* 2018, 628, 1627–1636. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.127>.

- Sabaratnam, S., 2018. Gummy stem blight of greenhouse cucumber. British Columbia ministry of agriculture. Available from: <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/animal-and-crops/plant-health/phu-gummystemblight-greenhousecucumberss.pdf> (accessed on 06 March 2022)
- Sakiyama, N. R. M., Carlo, J. C., Frick, J., Garrecht, H., 2020. Perspectives of naturally ventilated buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 130, 109933. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109933>
- Satti, S. M. E., Ahmad, R., 1992. Salinity tolerance in tomato. *Pak. J. Bot.* 1992, 24, 35–39. <https://www.pakbs.org/pjbot/archives2.php?vol=24&iss=1&yea=1992> (accessed on 11 February 2023).
- Savory, E. A., Granke, L. L., Quesada-Ocampo, L. M., Varbanova, M., Hausbeck, M. K., Day, B., 2011. The cucurbit downy mildew pathogen *Pseudoperonospora cubensis* *Mol Plant Pathol*, 12 (2011), pp. 217-226 <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00670.x>
- Saxena, D. R., Saxena, M., 2002. Influence of fungicidal spray on powdery mildew epidemics and major yield-attributing characters of mungbean. *Plant Pathol J* 18, 68–73. <https://doi.org/10.5423/PPJ.2002.18.2.068>
- Shetty, N. V., Wehner, T. C., Thomas, C. E., Doruchowski, R. W., Shetty, V. K. P., 2002. Evidence for downy mildew races in cucumber tested in Asia, Europe and North America. *Sci. Hortic.* 94, 231–239. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00013-4)
- Stewart-Wade, S. M., 2011. Plant pathogens in recycled irrigation water in commercial plant nurseries and greenhouses: their detection and management. *Irrigation Science*, 29(4), 267–297. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0285-1>
- Sun, Y., Wang, M., Mur, L. A. J., Shen, Q., Guo, S., 2020. Unravelling the roles of nitrogen nutrition in plant disease defences. *Int. J. Mol. Sci.* 2020, 21, 572. <https://doi.org/10.3390/ijms21020572>
- Suthaparan, A., Pathak, R., Solhaug, K. A., Gislerød, H. R., 2018. Wavelength dependent recovery of UV-mediated damage: tying up the loose ends of optical based powdery mildew management. *J. Photochem. Photobiol. B* 178, 631–640. <https://10.1016/j.jphotobiol.2017.12.018>

- Suthaparan, A., Solhaug, K. A., Bjugstad, N., Gislerød, H. R., Gadoury, D. M., Stensvand, A., 2016. Suppression of powdery Mildews by UV-B: Application Frequency and Timing, Dose, Reflectance, and Automation. *Plant Dis.* 2016, 100, 1643–1650. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-15-1440-RE>
- Suthaparan, A., Solhaug, K. A., Stensvand, A., Gislerød, H. R., 2017. Daily light integral and day light quality: potentials and pitfalls of night time UV treatments on cucumber powdery mildew. *J. Photochem. Photobiol. B* 175, 141–148. <https://10.1016/j.jphotobiol.2017.08.041>
- Tantau, H., J., Akyazi, G., 2017. The low energy greenhouse – heat transfer by long wave radiation. *Acta Horticulturae*, 1170, 847–854. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.108>
- Thomas, A., Carbone, I., Choe, K., Quesada-Ocampo, L. M., Ojiambo, P. S., 2017. Resurgence of cucurbit downy mildew in the United States: Insights from comparative genomic analysis of *Pseudoperonospora cubensis*. *Ecol. Evol.*; 2017; 7, pp. 6231-6246. <https://dx.doi.org/10.1002/ece3.3194>
- Valera, D. L., Belmonte, L. J., Molina-Aiz, F.D., López, A., 2016. Greenhouse Agriculture in Almería. A Comprehensive Techno-Economic Analysis. Cajamar Caja Rural, Almería, Spain, 408 pp. [Available online: <http://www.publicacionescajamar.es/series-tematicas/economia/greenhouse-agriculture-in-almeria-a-comprehensive-techno-economic-analysis/> (accessed on 08 April 2022)].
- Van Straten, G., Van Willigenburg, G., Van Henten, E., Van Ooteghem, E., 2010. Optimal Control of Greenhouse Cultivation; CRC Press: London, UK, 2010; p. 326. ISBN 978-1-42-005961-8. <https://doi.org/10.1201/b10321>
- Von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., von Zabeltitz, C., Gratraud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R., 2000. Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements. *J. Agric. Eng. Res.* 2000, 75, 1–16. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0502>.
- Von Zabeltitz., Chr., 1994. Effective use of renewable energies for greenhouse heating. *Renewable Energy*, 5(1), 479–485. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90419-7](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90419-7)

- Wang, H. W., Xu, M., Cai, X. Y., Feng, T., Xu, W. L., 2020. Application of spent mushroom substrate suppresses Fusarium wilt in cucumber and alters the composition of the microbial community of the cucumber rhizosphere. *European Journal of Soil Biology*, 101, 103245–. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103245>
- Yang, M., Wei, Q., Shi, L., Wei, Z., Lv, Z., Asim, N., Zhang, K., Ge, B., 2021. Wuyiencin produced by *Streptomyces albulus* CK-15 displays biocontrol activities against cucumber powdery mildew. *Journal of Applied Microbiology*, 131(6), 2957–2970. <https://doi.org/10.1111/jam.15168>
- Yermiyahu, U., Halpern, M., Shtienberg, D., 2020. NH₄ fertilization increases susceptibility of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) to grey mould (*Botrytis cinerea*) due to decrease in Ca uptake. *Phytoparasitica* 2020, 48, 685–697. <https://doi.org/10.1007/s12600-020-00832-5>
- Yoon, H. I., Kim, J. H., Park, K. S., Namgoong, J. W., Hwang, T. G., Kim, J. P., Son, J. E., 2020. Quantitative methods for evaluating the conversion performance of spectrum conversion films and testing plant responses under simulated solar conditions. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 61, 999–1009. <https://doi.org/10.1007/s13580-020-00286-y>
- Zhang, J., Zhao, S., Dai, A., Wang, P., Liu, Z., Liang, B., Ding, T., 2022. Greenhouse Natural Ventilation Models: How Do We Develop with Chinese Greenhouses? *Agronomy (Basel)*, 12(9), 1995–. <https://doi.org/10.3390/agronomy12091995>
- Zheng, Z., Nonomura, T., Appiano, M., Pavan, S. N., Matsuda, Y., Toyoda, H., Wolters, A. M. A., Visser, R. G. F., Bai, Y., Vinatzer, B. A., 2013. Loss of Function in Mlo Orthologs Reduces Susceptibility of Pepper and Tomato to Powdery Mildew Disease Caused by *Leveillula taurica*. *PloS One*, 8(7), e70723–e70723. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070723>
- Zitter, T. A., 1992. Gummy Stem Blight. Cooperative extension. New York State. Cornell University. Fact Sheet Page: 730.70. Available from: http://vegetablemdonline.ppath.cornell.edu/factsheets/Cucurbit_GSBlight.htm (accessed on 17 March 2023)



Estudio de la incidencia de enfermedades fúngicas en invernaderos mediterráneos con diferentes técnicas de control climático de bajo coste



**Estudio de la
incidencia de
enfermedades
fúngicas en
invernaderos
mediterráneos con
diferentes técnicas de
control climático de
bajo coste**



