



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

TESIS DOCTORAL

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS INVERNADEROS HORTÍCOLAS EN EL ÁREA DE ALMERÍA PARA LA COMPATIBILIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA CON LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA.

EVALUATION OF VEGETABLE GREENHOUSES POTENTIAL IN THE ALMERIA AREA FOR THE COMPATIBILIZATION OF AGRICULTURAL AND PHOTOVOLTAIC PRODUCTION.

Autora:

Guadalupe López Díaz

Director:

Angel Carreño Ortega

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍA DE INVERNADEROS E INGENIERÍA INDUSTRIAL Y AMBIENTAL

Almería, abril de 2021

AGRADECIMIENTOS

Con estas líneas quiero agradecer el apoyo y colaboración de todos aquellos amigos, familiares, compañeros, profesores, empresas y entidades que han contribuido de una manera u otra a la realización de esta tesis.

Esta investigación ha sido posible gracias al apoyo del Centro Tecnológico TECNOVA y del conjunto de profesionales que lo forman, los cuales dedican sus esfuerzos para una agricultura bajo invernadero más competitiva y sostenible.

A todos vosotr@s, que leyendo estas líneas os reconocéis o simplemente os alegráis de que finalmente este documento se publique... GRACIAS!

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

**RESUMEN
(ABSTRACT)**

RESUMEN

El objetivo de la tesis es la ***evaluación del potencial tanto técnico como económico de los invernaderos en la provincia de Almería para la compatibilización de la producción hortícola y energética con paneles fotovoltaicos. Para ello, se han evaluado los efectos de diferentes porcentajes de sombreado en la calidad comercial de frutos de tomate producidos bajo invernadero en las condiciones de Almería y se ha valorado la rentabilidad de las inversiones.***

Resumen de la tesis: Los invernaderos fotovoltaicos se presentan como una solución para cubrir las demandas energéticas de los cultivos. Por tanto, es necesario conocer el nivel de sombreado máximo que podrían producir la instalación de placas fotovoltaicas en cubierta del invernadero sin que esto afecte al rendimiento del cultivo. La presente tesis analiza niveles crecientes de sombreado que producen láminas opacas que simulan módulos fotovoltaicos ubicadas en el exterior del techo de invernadero con orientación norte-sur, sobre un cultivo de tomate en el sureste español. Se estudiaron tres niveles de sombreado (15%, 30% y 50%) y se compararon con un testigo sin sombra (0%). Los parámetros estudiados fueron radiación, temperatura, pH y conductividad eléctrica del sustrato, rendimiento del cultivo y calidad del fruto. Los resultados ilustran que la instalación de un elevado número de módulos fotovoltaicos en el techo del invernadero reduce excesivamente la radiación interior a niveles que afectan al rendimiento del cultivo y la calidad del fruto, incluso en latitudes como Almería donde la radiación no suele ser un factor limitante en los cultivos. Desde el punto de vista económico, el sombreado fotovoltaico ajustado a cubrir las demandas energéticas medias de los invernaderos en el área de Almería, se presenta como una alternativa sostenible y económicamente viable para los agricultores de la provincia.

Keywords: Tomate, invernadero fotovoltaico, sombreado, microclima, rendimiento, calidad de fruto.

ABSTRACT

The main goal of this PhD study is to ***evaluate the technical and economic potential of Almería area to make compatible horticultural crops with energy production with photovoltaic panels under greenhouse. For this purpose, in Almería Greenhouse conditions, different percentages of shading has been evaluated against marketable tomato production and return of investments evaluation.***

Abstract: Photovoltaic greenhouses has the potential to solve energy demand from protected horticultural crops. Thus, is necessary to know which is the maximum level of shading caused by photovoltaic installation, avoiding negative effects on crop yields. This PhD study analyses the effect of growing percentages of shading with opaque material sheets simulating photovoltaic panels, in N-S oriented greenhouse roof on tomato crop in Spanish South-East area.

Three shading percentages (15%, 30% and 50%) where studied against a 0% shading treatment. Studied parameters included radiation, temperature, pH and Electrical Conductivity in the substrate, yields and fruit quality. Results of the evaluation shows that the installation of big areas of photovoltaic modules in the greenhouse roof, excessively reduce inside radiation in the greenhouse to levels that negatively affects to yields and fruit quality, even on Almeria latitude, where radiation is not usually a constraint in the crops growth. In the economic analysis, the photovoltaic shading for self-consume of energy demand in the Almería greenhouse area, is presented as an sustainable and viable alternative for farmers in the Almería area.

Keywords: Tomato, photovoltaic greenhouse, shading, microclimate, yield, fruit quality.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
INDICE DE FIGURAS	10
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	13
CAPITULO 2. REVISION BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Alineación de la tesis con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.....	18
2.2. Agricultura bajo invernadero, superficies, características y demanda energética.....	23
2.2.1. Los invernaderos en la provincia de Almería	25
2.2.2. Tipologías de estructura	27
2.3. Demanda Energética de los invernaderos	36
2.4. Evolución de las tecnologías de producción fotovoltaica, materiales, eficiencia y precios para su aplicación en invernaderos fotovoltaicos.	42
2.5. Situación legislativa en España	51
2.6. Resultados previos sobre % de sombreado en ensayos en invernaderos fotovoltaicos.....	54
2.7. Experiencias comerciales de invernaderos fotovoltaicos en la provincia de Almería.	68
2.8. Patentes relacionadas	71
CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	78
3.1. Diseño experimental.	79
3.2. Condiciones de cultivo.....	84
3.3. Medida de parámetros climáticos.	85
3.4. Medida de parámetros agronómicos.....	87
3.5. Análisis de datos.....	91
3.6. Análisis económico y de rentabilidad	91
3.6.1. Metodología y valores utilizados en el análisis.....	91
3.6.2. Escenarios contemplados	93
CAPITULO 4. RESULTADOS	98
4.1. Efecto del sombreado de las láminas fotovoltaicas sobre la temperatura y la radiación PAR.....	99
4.2. Conductividad eléctrica y pH de la solución del suelo.....	103
4.3. Efecto del sombreado sobre el rendimiento del cultivo	105
4.4. Efecto del sombreado sobre la calidad de fruto	109

4.5. Viabilidad económica de los invernaderos fotovoltaicos en la provincia de Almería	110
CAPITULO 5. DISCUSIÓN	124
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ..	129
CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	137
ANEXOS	147
ANEXO I: REGISTRO DE DATOS.....	148
ANEXO II: LISTADO DE NORMATIVA.....	159
ANEXO III: PATENTE SOLNOVA	163
ANEXO IV: PUBLICACIONES.....	164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las demandas energéticas de invernaderos en el área mediterránea	41
Tabla 2. Eficiencia de las células fotovoltaicas disponibles en el mercado según el material.	43
Tabla 3. Resumen de parámetros de eficacia y características en invernaderos fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia, varios autores.....	45
Tabla 4. Alternativas de sombreado e ingresos estimados de la actividad agrícola	97
Tabla 5. Efecto del sombreado sobre el rendimiento total acumulado (kg · m ²) de tomate.	105
Tabla 6. Efecto del sombreado sobre la calidad de fruto.....	109
Tabla 7. Producción fotovoltaica y compensación de excedentes hipótesis inicial	113
Tabla 8. Datos estimados del gasto energético de la finca con paneles solares fotovoltaicos instalados.	114
Tabla 9. Resultados de la simulación para inclinación de las placas fotovoltaicas según ángulo de cubierta	117
Tabla 10. Resultados de la simulación para % de autoconsumo del 100%.....	118
Tabla 11. Potencia pico instalada y producción anual fotovoltaica en las diferentes alternativas de sombreado.....	121
Tabla 12. Datos de ingresos considerados en el cálculo de la rentabilidad para grandes productores de energía asociados a la actividad agrícola.....	122
Tabla 13. Análisis económico de inversiones por encima de los 100 kWp.....	123

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible.	14
Figura 2. Principios y acciones de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.	21
Figura 3. Área de producción estimada de hortalizas en invernadero y concentraciones de agricultura vertical.	24
Figura 4. Evolución de la superficie invernada en la provincia de Almería (ha).	26
Figura 5. Evolución de la producción hortícola almeriense (Tm).	27
Figura 6. Tipos de invernadero (%superficie).....	27
Figura 7. Evolución de los porcentajes de diferentes tipos de invernaderos en las principales regiones agrícolas de Almería en los años 2013 y 2017.	28
Figura 8. Invernadero parral plano. Fotografía detalle interior.....	29
Figura 9. Invernadero Raspa y Amagado en construcción.....	30
Figura 10. Colapso de Invernadero tipo Almería por carga de granizo. Almería, enero 2020.	31
Figura 11. Colapso de Invernadero tipo Almería por carga de granizo. Almería, enero 2020.	32
Figura 12. Invernadero multitúnel semicircular (izq.) y ojival (dcha.).....	33
Figura 13. Invernadero tipo Venlo (Valera et al, 2017).....	34
Figura 14. Consumo energético específico por invernadero.....	37
Figura 15. Valores de producción de tomate en diferentes países y tipos de invernadero.	38
Figura 16. Comparación de eficiencia entre tecnologías.....	44
Figura 17. Evolución de la eficiencia en condiciones de laboratorio de las diferentes tipos de células fotovoltaicas.....	44
Figura 18. Electricidad generada versus impacto en el crecimiento del cultivo.	46
Figura 19. Evolución del precio del panel solar (€/Wp).	48
Figura 20. Potencia solar fotovoltaica instalada. Sistema eléctrico nacional.	49
Figura 21. Resumen legislativo de la normativa de sistemas fotovoltaicos en España.....	51
Figura 22. Publicaciones relativas a compatibilidad entre cultivo y paneles solares.....	54
Figura 23. Diagrama esquemático del invernadero N-S con la colocación de paneles fotovoltaicos. PV ₁ -PV ₄ fueron instalados dentro del invernadero y PV ₅ por fuera de la cubierta.....	56
Figura 24. Ensayo de distribución de placas fotovoltaicas sobre cubierta de invernadero.)	57
Figura 25. Invernadero fotovoltaico con sombreado del 50%.....	59
Figura 26. Tipologías de invernadero y sombreados estudiados.	60

Figura 27. Rendimiento de tomate en ensayo de sombreo 50%.....	61
Figura 28. Disposición de placas en cubierta (10% de cobertura).....	62
Figura 29. Detalle de la disposición de las células fotovoltaicas en invernadero de túnel.....	63
Figura 30. Potencia fotovoltaica instalada en el mundo (MW).....	64
Figura 31. Nueva potencia fotovoltaica instalada en España (kW).....	65
Figura 32. Superficie de invernaderos en China de 2009 a 2013.....	65
Figura 33. Fotografías del prototipo e infografías de SUN4GREEN.....	68
Figura 34. Vista aérea de invernadero comercial con cubierta fotovoltaica.....	69
Figura 35. Vista interna de invernadero comercial con cubierta fotovoltaica.....	69
Figura 36. Ilustración de la patente ES2301132.....	71
Figura 37. Ilustración de la patente ES2390553.....	72
Figura 38. Ilustración de la patente ES2448290.....	73
Figura 39. Ilustración de la patente ES2498734.....	74
Figura 40. Ilustración de la patente ES2537029.....	74
Figura 41. Ilustración de la patente ES2575020.....	75
Figura 42. Ilustración de la patente ES2727278.....	76
Figura 43. Ilustración de la patente ES2715723.....	77
Figura 44. Vista exterior del invernadero SOLNOVA antes de la instalación de sombreo para el ensayo.....	79
Figura 45. Disposición de los módulos fotovoltaicos y planchas de polietileno sobre cubierta del invernadero.....	81
Figura 46. Detalle de la ubicación de las láminas de polietileno negras opacas en el exterior de la cubierta del invernadero del tratamiento del 50% de sombra.....	82
Figura 47. Disposición de los módulos fotovoltaicos y planchas de polietileno sobre cubierta del invernadero.....	83
Figura 48. Disposición del sustrato de fibra de coco en el invernadero en el que se realizó la investigación.....	84
Figura 49. Registro de datos de radiación exterior del día 05/12/2014.....	85
Figura 50. Disposición de las plantas de cada repetición y tratamiento en el invernadero en el que se realizó la investigación. También se indica la distribución de los sensores de radiación en el interior del invernadero.....	86
Figura 51. Detalle de la ubicación de los sensores de radiación (izquierda), temperatura (derecha).....	87
Figura 52. Estadillo de recogida de datos de pH del sustrato en campo.....	88
Figura 53. Medida peso (izq) y textura (derecha) de los frutos.....	89
Figura 54. Medida del color en frutos de tomate.....	90

Figura 55. Evolución de la radiación media mensual ($W m^{-2}$) del exterior del invernadero para el periodo de estudio (izquierda). Evolución de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) media mensual del interior del invernadero en el tratamiento control (0% sombra) el periodo de estudio (derecha).	99
Figura 56. Evolución diaria media mensual de la reducción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) que produce el sombreado (15%, 30% y 50%) con respecto a la radiación del control (0%) para el periodo de estudio.....	100
Figura 57. Reducción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) que producen las superficies de sombra del 15%, 30% y 50% con respecto a la radiación del control (0%). En la figura se representa el promedio del periodo de octubre a mayo.	101
Figura 58. Evolución diaria media mensual de la temperatura producida por los tratamientos de sombreado (0% 15%, 30% y 50%) para el periodo de estudio.....	102
Figura 59. Evolución temporal y promedio del periodo del pH y la conductividad eléctrica (CE) de la solución del sustrato de cultivo ($dS \cdot m^{-1}$).....	104
Figura 60. Efecto del sombreado sobre la evolución temporal del rendimiento comercial acumulado ($kg \cdot m^{-2}$).....	106
Figura 61. Relación entre el incremento del sombreado y el rendimiento total y comercial acumulado ($kg \cdot m^{-2}$) al final del ciclo de cultivo.	106
Figura 62. Efecto del sombreado sobre la producción ($kg \cdot m^{-2}$) de frutos verdes (total, comercial y no comercial) recolectados en la última recolección (239 d.a.t.).	107
Figura 63. Efecto del sombreado sobre el número de frutos (total, comercial y no comercial) por m^{-2} recolectados en la última recolección (239 d.a.t.).	108
Figura 64. Efecto del sombreado sobre el color del fruto.	110
Figura 65. Aplicación PVGIs para el cálculo de instalaciones fotovoltaicas.....	111
Figura 66. Resultados de la simulación para 12,0 kWp.....	112
Figura 67. Producción Energética vs. Consumo del invernadero	112
Figura 68. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario inicial..	115
Figura 69. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario de placas según ángulo de cubierta.....	119
Figura 70. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario de autoconsumo 100%	119
Figura 71. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario considerando la obtención de subvenciones.....	120
Figura 72. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario considerando una disminución del Wp instalado.....	120

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

La producción de energía y alimentos de forma sostenible es una de las preocupaciones de la sociedad actual. La sostenibilidad energética y la integración de sistemas de generación de energía renovables es uno de los retos de la agricultura del futuro.

Según estimaciones de (FAO, 2009), “se calcula que la población mundial alcanzará los 9,1 billones de personas para el año 2050, un 34 % más que hoy en día. La producción alimentaria deberá aumentar en un 70 % para abastecer a esta mayor población que, con toda probabilidad, será especialmente urbana. Garantizar un suministro de alimentos sostenible para la población mundial en rápido crecimiento constituye un importante desafío”.

En este sentido, en 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible; según (United Nations, 2015), la agenda es *“una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendan un nuevo camino con el que mejorar la vida de todos, sin dejar a nadie atrás. La Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente o el diseño de nuestras ciudades”* (Figura 1).

Entre los 17 objetivos, podemos destacar, el objetivo 2 “Hambre Cero”, y el objetivo 7 “Energía Asequible y no contaminante”, como especialmente alineados con la temática de la presente tesis.



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
Fuente: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>

Los cultivos de alto rendimiento como los invernaderos se plantean como una alternativa para el abastecimiento de la demanda de alimentos, en un entorno de crecimiento de la población, escasez de tierras de cultivo y recursos hídricos y cambio climático.

El avance en las tecnologías de producción asociadas al cultivo en invernadero para incrementar la productividad y rentabilidad de los sistemas de cultivo como sistemas de riego y fertilización localizados, calefacción, refrigeración, control de humedad, iluminación LED, etc. han hecho incrementar la demanda energética de los invernaderos.

La generación de energía fotovoltaica asociada a las explotaciones agrícolas es una de las soluciones que se plantean con mayor viabilidad como “fuente verde” de energía, especialmente, en los países del trópico. Muchas investigaciones han demostrado que la producción de energía fotovoltaica en invernadero podría satisfacer las necesidades de energía de las explotaciones y proporcionar ingresos adicionales para los productores por la venta de la energía a la red.

Sin embargo, la evidente competencia entre plantas y paneles solares por el recurso sol, lastra el desarrollo de esta simbiosis natural, de los conocidos como “invernaderos fotovoltaicos” o “invernaderos solares”. No obstante, existen documentadas diversas experiencias de invernaderos fotovoltaicos con diferente grado de cobertura o sombreado y cultivo.

Asimismo, el estado del arte de la tecnología fotovoltaica en los últimos años ha permitido el desarrollo de paneles y materiales con mayor eficiencia, menos peso, transparencia, disminución de precios, etc. lo cual está permitiendo nuevas alternativas al desarrollo e implantación de los invernaderos fotovoltaicos.

La agricultura bajo invernadero representa un importante sector económico con una superficie en España de 74.300 ha y una producción de 5.384.006 Tm (MAPAMA, 2019). La producción bajo estructuras invernadas tiene su mayor exponente en la **provincia de Almería**, alcanzando las 35.839 hectáreas en la campaña hortícola 2019/2020. Teniendo en cuenta los múltiples ciclos de producción que se pueden dar bajo plástico y los cultivos al aire libre, el total cultivado ascendió a 60.699 ha (Cajamar, 2020). La producción de hortalizas en los invernaderos de Almería se situó en 3.721.118 toneladas en la campaña 2018/2019.

Por tanto, Almería, se presenta como una localización idónea para el desarrollo del concepto de invernaderos fotovoltaicos.

La **hipótesis de partida** de la tesis es que porcentajes de sombreado fotovoltaico superiores al 15% de la superficie de cubierta, afectan al rendimiento comercial y calidad del fruto de tomate en las condiciones de Almería.

Los **objetivos de la tesis** son:

- Evaluar los efectos de diferentes porcentajes de sombreado en la calidad comercial de frutos de tomate producidos bajo invernadero en las condiciones de Almería.
- Evaluar económicamente la rentabilidad de la instalación de placas fotovoltaicas en cubierta de invernadero para acogerse al régimen de autoconsumo.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

La presente tesis se estructura en los siguientes apartados:

- Revisión bibliográfica
- Materiales y Métodos
- Resultados
- Discusión
- Conclusiones y futuras líneas de investigación
- Bibliografía
- Anexos

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

CAPITULO 2. REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1. Alineación de la tesis con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas

La agricultura, de manera general, cobra una especial relevancia en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible marcados por las Naciones Unidas en Septiembre del año 2015. El informe (United Nations, 2015), marca con la Agenda de desarrollo Sostenible 2030, *“un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, con objeto de fortalecer la paz y erradicar la pobreza”*. La agenda se sintetizó en 17 Objetivos y 169 Metas que los países representantes se comprometen a poner en marcha para lograr el desarrollo sostenible en sus tres dimensiones —económico, social y ambiental.

“Este informe concreta los objetivos de desarrollo sostenible en 17:

- *Objetivo 1. Poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todo el mundo*
- *Objetivo 2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible*
- *Objetivo 3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades*
- *Objetivo 4. Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos*
- *Objetivo 5. Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y las niñas*
- *Objetivo 6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos*
- *Objetivo 7. Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos*
- *Objetivo 8. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos*
- *Objetivo 9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación*
- *Objetivo 10. Reducir la desigualdad en los países y entre ellos*
- *Objetivo 11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles*
- *Objetivo 12. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*
- *Objetivo 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*
- *Objetivo 14. Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible*
- *Objetivo 15. Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad*
- *Objetivo 16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y construir a todos los niveles instituciones eficaces e inclusivas que rindan cuentas*
- *Objetivo 17. Fortalecer los medios de implementación y revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible”*

La agricultura está directamente relacionada con el ODS2, pero también es determinante para el resto de objetivos, en especial algunos como el ODS15, en la preservación de las tierras y la biodiversidad, la lucha y adaptación al cambio climático, ODS13, la gestión de los recursos hídricos, ODS6 y 15, garantizar modelos de producción y consumo sostenibles, ODS7, desarrollando sistemas que integren el uso de las energías renovables, ODS12, y el objetivo más global, de contribuir a la erradicación de la pobreza, ODS1.

El sector agrícola, su **evolución y transformación**, es clave para el cumplimiento de muchos de estos objetivos (Kanter et al, 2016). El reto de los ODS, es particularmente complejo para el sector agrícola, dada la heterogeneidad de condiciones, el impacto medioambiental generado y su relación con varios aspectos del desarrollo sostenible, desde la educación y alivio de la pobreza a la salud y el medioambiente.

Para ayudar a entender esta complejidad e importancia de la agricultura en los ODS, y guiar a las instituciones en el desarrollo de políticas de cambio, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, 2018), publicó el documento “Transformar la alimentación y la agricultura para alcanzar los ODS: 20 acciones interconectadas para guiar a los tomadores de decisiones”. Este documento plantea un enfoque que se basa en **“cinco principios y 20 acciones, que equilibran las dimensiones sociales, económicas y medio ambientales de la sostenibilidad, y conforma la base para elaborar políticas, estrategias, regulaciones e incentivos que se adapten a las necesidades.**

Los cinco principios clave son:

1. *Aumentar la productividad, el empleo y el valor añadido en los sistemas de alimentación.*
2. *Proteger e impulsar los recursos naturales.*
3. *Mejorar los medios de subsistencia y fomentar el crecimiento económico sostenible.*
4. *Potenciar la resiliencia de las personas, de las comunidades y de los ecosistemas.*
5. *Adaptar la gobernanza a los nuevos retos.”*

La agricultura en invernadero, y en concreto el desarrollo de los invernaderos fotovoltaicos pueden contribuir significativamente al cumplimiento de los mismos.

“Estos cinco principios se materializan en 20 acciones, que contribuyen directamente al cumplimiento de los ODS:

1. *Facilitar el acceso a recursos productivos, a la financiación y a los servicios*
2. *Conectar a los pequeños agricultores con los mercados*
3. *Fomentar la diversificación de la producción y de los ingresos*
4. *Fomentar el conocimiento de los productores y desarrollar sus capacidades*
5. *Mejorar la salud del suelo y restaurar la tierra*
6. *Proteger el agua y gestionar la escasez*
7. *Fomentar la conservación de la biodiversidad y proteger las funciones de los ecosistemas*
8. *Reducir las pérdidas, fomentar la reutilización y el reciclaje, y promover el consumo sostenible*
9. *Empoderar a las personas y luchar contra la desigualdad*
10. *Fomentar unos derechos de tenencia seguros*

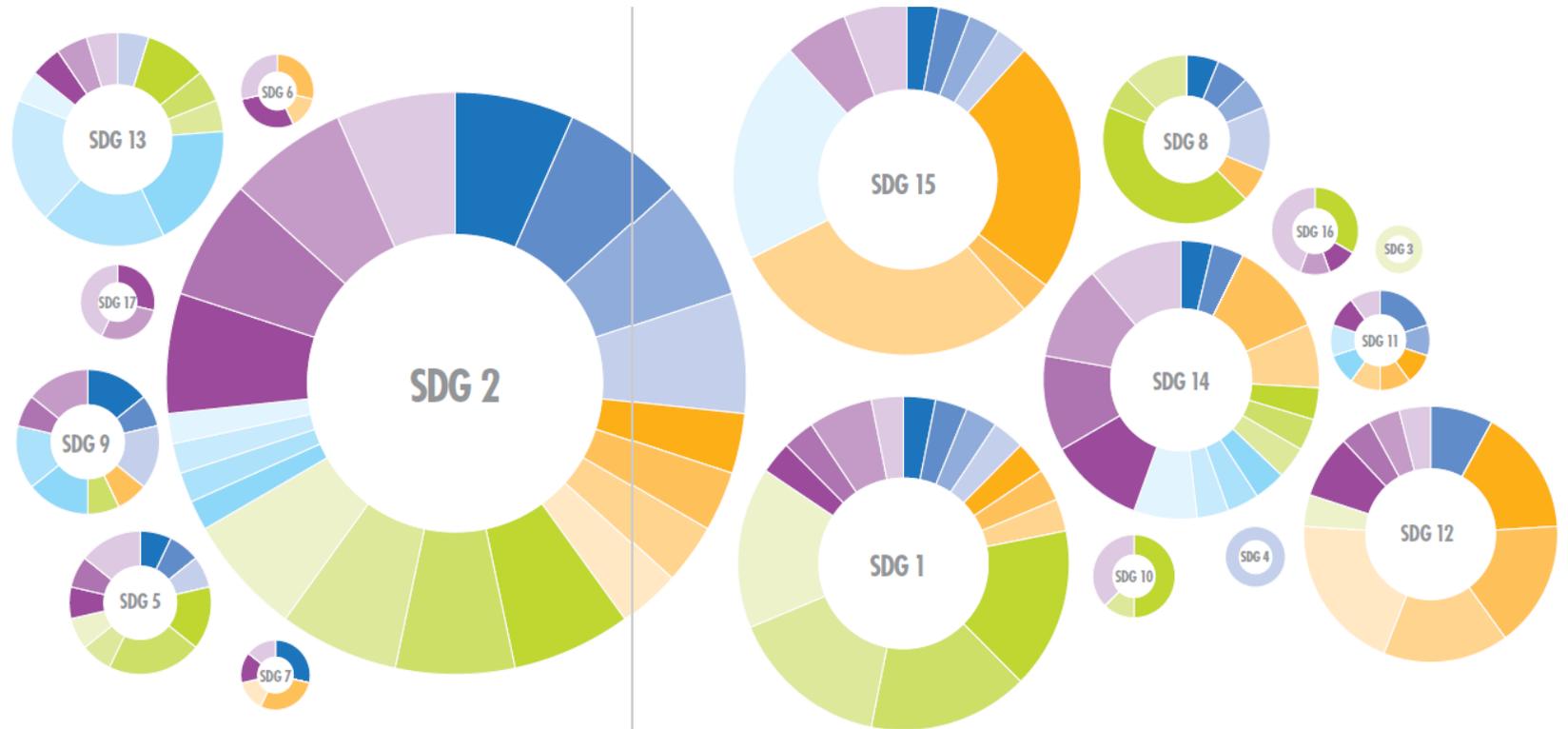
“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

11. *Las herramientas de protección social como medio para aumentar la productividad y los ingresos*
12. *Mejorar la nutrición y fomentar dietas equilibradas*
13. *Prevención y protección contra desastres: fomentar la resiliencia*
14. *Prepararse y responder a los desastres*
15. *Hacer frente y adaptarse al cambio climático*
16. *Reforzar la resiliencia de los ecosistemas*
17. *Fomentar el diálogo sobre políticas y la coordinación*
18. *Reforzar los sistemas de innovación*
19. *Adaptar y mejorar las inversiones y la financiación*
20. *Fortalecer un entorno propicio y reformar el marco institucional”*

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

SDGs

- SDG 1: No Poverty
- SDG 2: Zero Hunger
- SDG 3: Good Health and Well-Being for people
- SDG 4: Quality Education
- SDG 5: Gender Equality
- SDG 6: Clean Water and Sanitation
- SDG 7: Affordable and Clean Energy
- SDG 8: Decent Work and Economic Growth
- SDG 9: Industry, Innovation and Infrastructure
- SDG 10: Reduced Inequalities
- SDG 11: Sustainable Cities and Communities
- SDG 12: Responsible Consumption and Production
- SDG 13: Climate Action
- SDG 14: Life Below Water
- SDG 15: Life on Land
- SDG 16: Peace, Justice and Strong Institutions
- SDG 17: Partnerships for the Goals



ACTIONS

- 1** Facilitate access to productive resources, finance and services
- 2** Connect smallholders to markets
- 3** Encourage diversification of production and income
- 4** Build producers' knowledge and develop their capacities

Principle 1

- 5** Enhance soil health and restore land
- 6** Protect water and manage scarcity
- 7** Mainstream biodiversity conservation and protect ecosystem functions
- 8** Reduce losses, encourage reuse and recycle, and promote sustainable consumption

Principle 2

- 9** Empower people and fight inequalities
- 10** Promote secure tenure rights for men and women
- 11** Use social protection tools to enhance productivity and income
- 12** Improve nutrition and promote balanced diets

Principle 3

- 13** Prevent and protect against shocks: enhance resilience
- 14** Prepare for and respond to shocks
- 15** Address and adapt to climate change
- 16** Strengthen ecosystem resilience

Principle 4

- 17** Enhance policy dialogue and coordination
- 18** Strengthen innovation systems
- 19** Adapt and improve investment and finance
- 20** Strengthen the enabling environment and reform the institutional framework

Principle 5

Figura 2. Principios y acciones de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: (FAO, 2018)

En relación al ODS7 “Energía asequible y no contaminante” para 2030, es necesario invertir en fuentes de energía limpia, como la solar, eólica y termal y mejorar la productividad energética.

La generación de energía fotovoltaica asociada a las explotaciones agrícolas es una de las soluciones que se plantean con mayor viabilidad como “fuente verde” de energía, especialmente, en regiones como Almería, con una elevada cantidad de horas de sol anuales. La producción de energía fotovoltaica en invernadero podría satisfacer las necesidades de energía de las explotaciones y proporcionar ingresos adicionales para los productores por la venta de la energía a la red.

Sin embargo, la evidente competencia entre plantas y paneles solares por el recurso sol, lastra el desarrollo de esta simbiosis natural, de los conocidos como “invernaderos fotovoltaicos” o “invernaderos solares”.

En términos económicos, se han desarrollado estudios que avalan la rentabilidad del sistema productivo propuesto (Carreño-Ortega et al, 2017), los cuales afirman: *“Si tenemos en cuenta, por ejemplo, que el 10% de las 41.092 hectáreas de invernaderos existentes en el sudeste de España fueron a cubrir por los módulos fotovoltaicos, genera el potencial de producción de energía máxima, con la tecnología actual, sería 8.507 GWh / año, lo que equivale a 731,47 ktep. Tras un análisis de sensibilidad, se estima que la utilización de esta tecnología en el escenario de autoconsumo a nivel de finca produce una mayor rentabilidad para las fincas, que puede oscilar entre 0,88% (peor escenario) y 52,78% (escenario más favorable)”*

La propuesta de invernaderos fotovoltaicos, compatibilizando la producción agrícola y energética contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial a:

ODS2 “Hambre Cero”. La agricultura bajo invernadero contribuye al incremento del volumen de producción por unidad de trabajo según el tamaño de empresa gracias a los elevados rendimientos obtenidos con los sistemas de cultivo bajo invernadero, y asimismo, al % de superficie agrícola que sigue prácticas agrícolas sostenibles, con un uso sostenible de agua e insumos agrícolas y tecnologías que permiten optimizar el uso de recursos a las necesidades de las plantas.

ODS7 “Energía asequible y no contaminante”. En este reto, la agricultura bajo invernadero, tienen mucho que aportar, especialmente en el indicador Participación de la energía renovable en el consumo total de energía final, gracias a la cantidad de superficie de cubierta disponible, que en zonas geográficas con alta radiación solar como es el caso de Almería, podrían generar una producción compatible.

2.2. Agricultura bajo invernadero, superficies, características y demanda energética

La agricultura en invernadero aúna las características para la producción de alimentos saludables y de calidad durante todo el año, con un uso sostenible de los recursos. Por ello, debido a los retos a afrontar para la alimentación de la población en entornos de cambio climático y escasez de recursos, este tipo de producción, incluyendo nuevos sistemas como las granjas de agricultura vertical, están experimentando un crecimiento a nivel global. El informe World Vegetable Map 2018 (Rabobank, 2018) estima el área de invernaderos mundial en **500.000 ha**, la mayoría de ellos de plástico, siendo solo el 8% invernaderos de cristal:

“Según el informe, China, con 82.000 hectáreas, y España con 70.000 ha (de las cuales la mitad se concentran en la provincia de Almería), se sitúan como los dos primeros países del mundo en cuanto a superficie agrícola dedicada a la producción en invernaderos de estructuras no desmontables. Europa es el área geográfica con mayor concentración de invernaderos con 210.000 ha, por delante de Asia (180.000 ha), África (44.700 ha), Oriente Próximo (27.000 ha), Norte y Centro de América (23.000 ha), Suramérica (14.000 ha) y Oceanía (1.300 ha)” (Figura 3).

La superficie de invernaderos en el mundo registra un continuo crecimiento en los últimos años, estimándose en un 20% anual. Las estadísticas disponibles (Cuesta Roble, 2019), registran una evolución mundial al alza: de los 150.000 ha registradas en 1980, en enero de 2015 se registraron una superficie mundial de 414.127 ha, y el último registro disponible de 2019 asciende a 500.000 ha.

Los invernaderos del área mediterránea se encuentran concentrados en España (70.000 ha), Italia (42.800 ha), Turquía (41.384 ha), Marruecos (20.000 ha), Francia (11.500 ha), Israel (11.000 ha), y Países Bajos (4.970 ha).

Esta tesis, se centra en el estudio de **la producción en invernadero en Almería** bajo condiciones de sombreado provocado por placas solares fotovoltaicas en cubierta. Por ello, se revisa a continuación, las características de estas estructuras en la provincia.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”



Figura 3. Área de producción estimada de hortalizas en invernadero y concentraciones de agricultura vertical. Fuente: (Elaboración propia adaptado de Rabobank, 2018).

2.2.1. Los invernaderos en la provincia de Almería

El desarrollo de los invernaderos en la provincia de Almería, se estudia hoy en día como un modelo de negocio en Escuelas y Universidades Agrarias en todo el mundo, siendo numerosas las delegaciones comerciales, gubernamentales y formativas que visitan nuestra provincia para aprender de primera mano el denominado “modelo Almería”.

Tradicionalmente, *“el análisis de la economía provincial en el siglo XX, se ha dividido en tres periodos claramente diferenciados entre sí: la etapa de la minería, que tiene su esplendor a finales del XIX y principios del XX; la de la uva y en menor medida la naranja, que ocupan la parte central del siglo y, la actual, vinculada a la agricultura intensiva con importantes aportes del turismo y, de manera más localizada, del mármol”* (Molina, 2003)

Las condiciones climatológicas y edafológicas de la provincia de Almería, han marcado el desarrollo agrícola de la zona, siendo clave la incorporación tecnológica y la innovación desde el inicio del desarrollo del modelo. Los hitos que han marcado el desarrollo de la agricultura almeriense tal y como se conoce hoy en día han sido caracterizadas por varios autores como (Tolón y Lastra, 2010) y (Valera et al, 2017):

- *“1880, se registran las primeras referencias históricas de la técnica del enarenado en agricultores de la Costa de Granada, en las localidades de La Rábita y El Pozuelo en el municipio de Albuñol.*
- *1940, implantación de la técnica del enarenado en una parcela de La Romanilla, en Roquetas de Mar, por agricultores de la zona de La Rábita.*
- *1956-1957, experimentación, verificación y validación de la técnica del enarenado por parte del Instituto Nacional de Colonización (INC), posteriormente nombrado IRYDA (Instituto de Reforma y Desarrollo Agrícola).*
- *1960, primeras experiencias de uso de cobertura plástica del cultivo por parte del INC, aplicando técnicas como el mulching/ micro- túneles. Este tipo de instalaciones tuvieron un éxito limitado.*
- *1961- 1963, primeras estructuras del invernadero tipo Parral (plano), con la reconversión de las estructuras de guiado de los parrales de uva de mesa, y con nuevas estructuras sencillas de rollizos de eucalipto y alambre galvanizado, cubiertos con plástico de polietileno, adelantando el momento de recolección gracias al incremento de la temperatura interior.*
- *Década de los 60. Fase de colonización estatal, promovido por el IRYDA, con sus planes de infraestructuras eléctricas e hidráulicas, estimulando el asentamiento de colonos, facilitando asesoramiento técnico y financiación.*
- *Desarrollo del sistema productivo y comercial primario (década de los 60), con una generalización de la producción de hortalizas y una permanente incorporación de innovaciones para mejorar la productividad y la calidad de los productos*
- *Década de los 70. Desarrollo secundario y estructuración del sistema comercial. Desarrollo del sistema de comercialización para dar salida a las producciones agrícolas e incrementar su valor añadido.*
- *Década de los 80 y 90. Consolidación del sistema productivo y comercial. Generación de un clúster de actividades, la conocida como Industria Auxiliar de*

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

la Agricultura, que promueve las incorporaciones e innovaciones tecnológicas que permiten la evolución y desarrollo del sistema productivo.

- *Década de los 2000. Toma de conciencia de la sostenibilidad del sistema, implantación de técnicas de producción integrada, mejoras en la eficiencia de los sistemas de riego”*

En estos últimos años, las evoluciones del campo desde el punto de vista de la tecnología han estado centradas en la sensorización, big-data, valorización de residuos y desarrollo de productos sostenibles para el control de plagas y enfermedades.

Desde el punto de vista de **superficie**, la provincia de Almería es una de las mayores concentraciones geográficas de invernaderos en el mundo, alcanzando en 2019 las 32.048 ha según datos ofrecidos por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía. Después de unas décadas de crecimiento exponencial, en la actualidad el crecimiento en número de hectáreas es limitado Figura 4, centrándose en la actualidad las inversiones en la modernización de las explotaciones existentes, muchas de ellas obsoletas.

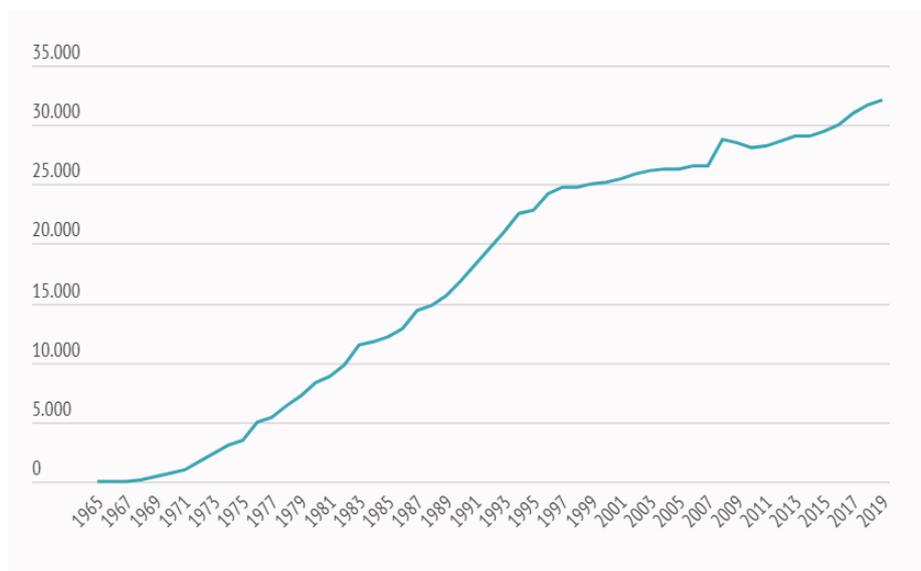


Figura 4. Evolución de la superficie invernada en la provincia de Almería (ha).
Fuente: (Cajamar, 2019)

De la misma manera, **la producción hortícola** generada en los invernaderos de Almería se ha incrementado proporcionalmente al desarrollo de la superficie invernada, así como a la incorporación de tecnologías que han mejorado el rendimiento y calidad de los productos hortofrutícolas. En la campaña 2018/2019, la producción hortícola total de la provincia almeriense ascendió a 3.764.735 toneladas, un 6,4 % superior a la campaña anterior (Figura 5).

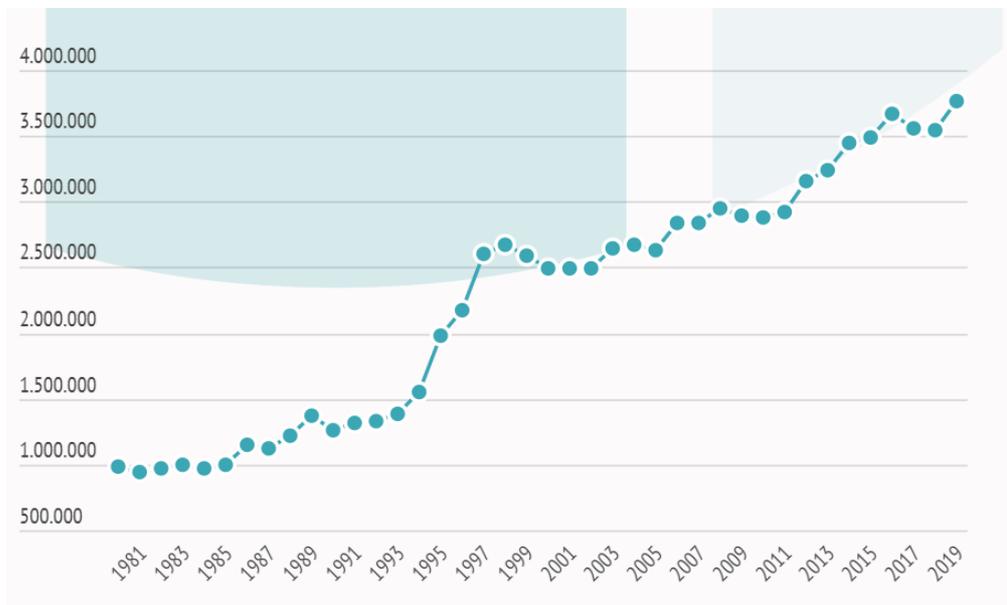


Figura 5. Evolución de la producción hortícola almeriense (Tm).
Fuente: (Cajamar, 2019)

2.2.2. Tipologías de estructura

En la provincia de Almería, podemos encontrar diversos tipos de invernaderos, siendo el protagonista indiscutible del denominado “Mar de Plástico” el invernadero denominado Tipo Almería.

Las estadísticas disponibles de las diferentes estructuras de invernadero publicadas por la Junta de Andalucía en su estudio “Caracterización de los invernaderos de Andalucía”, (AGAPA, 2015), arrojan que el 75,5 % de la superficie cubierta por invernaderos corresponde con la tipología “Raspa y Amagado”, y un 20,2% adicional a la categoría parral plano (Figura 6).

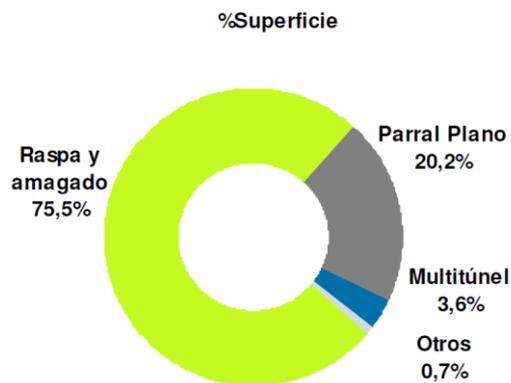


Figura 6. Tipos de invernadero (%superficie)
Fuente: (AGAPA, 2015)

Como vemos, las estructuras tradicionales, siguen representando un importante porcentaje de las estructuras presentes en la provincia. En la actualidad, estas estructuras están siendo modernizadas, habiéndose producido un proceso de reconversión del invernadero de la provincia de Almería desde el Parral Plano a estructuras de invernadero “Raspa y Amagado”, con mejoras incorporadas en cuanto a características constructivas, ventilación, posibilidades de mecanización, etc. Sin embargo, otras estructuras de carácter más industrial como el invernadero multitúnel o el multicapilla tipo Venlo no han llegado a implantarse en la provincia debido a su elevado precio por metro cuadrado y a la desconfianza generada entre los agricultores con respecto a su comportamiento frente al viento.

Esta evolución, ha sido plasmada por (Valera et al, 2017), estudiando la distribución de los diferentes tipos de estructuras en las principales regiones agrícolas de la provincia entre los años 1997 y 2013 (Figura 7).

Region	Flat-top	Raspa y amagado	Asymmetric	Cylindrical multi-span	Gothic/Gabled*	Screened
2013						
Campo de Dalías	15.2	75.8	6.1	1.5	0.8	0.8
Campo de Níjar	0.0	79.1	2.3	14.0	4.7	0.0
Bajo Andarax	14.3	75.0	10.7	0.0	0.0	0.0
Bajo Almanzora	0.0	77.8	22.2	0.0	0.0	0.0
Province of Almería	11.3	76.4	6.6	3.8	1.4	0.5
1997						
Campo de Dalías	64.2	29.2	3.5	0.4	2.7*	0.0
Campo de Níjar	64.2	30.4	1.8	1.8	1.8*	0.0
Bajo Andarax	71.8	15.3	2.6	0.0	10.3*	0.0
Bajo Almanzora	23.1	30.7	0.0	0.0	23.1*	23.1
Province of Almería	63.9	28.5	3.0	0.6	3.6*	0.4

Figura 7. Evolución de los porcentajes de diferentes tipos de invernaderos en las principales regiones agrícolas de Almería en los años 2013 y 2017.
Fuente: (Valera et al, 2017)

La tipología de las estructuras y su resistencia frente a las diferentes cargas, condiciona asimismo la potencial implantación de sistemas fotovoltaicos. Por ello, se revisa brevemente a continuación las principales estructuras de invernaderos en la provincia, de acuerdo a la revisión realizada por (Valera et al, 2017) y su potencial para la implantación de instalaciones de producción fotovoltaica en cubierta.

A. INVERNADERO TIPO ALMERIA

Dentro de esta denominación se engloban 3 sub-tipologías de invernaderos:

- El invernadero parral plano, una estructura obsoleta de cubierta plana y pilares de madera, que aún con sus limitaciones productivas, sigue representando una buena parte de la superficie productiva.
- El invernadero multicapilla simétrico “Raspa y Amagado”
- El invernadero multicapilla Asimétrico, una variante del anterior, que fue diseñado para optimizar la captación de radiación solar en las condiciones de nuestra provincia, pero que logró escasa aceptación entre los agricultores.

La estructura básica del invernadero se caracteriza por ser una tenso- estructura con una estructura horizontal y una vertical. La estructura vertical está compuesta por pilares, en la actualidad metálicos e inicialmente de madera, apoyados sobre bloques de hormigón. Perimetralmente se compone de vigas inclinadas cimentadas que sirven como soporte para la conformación de la estructura horizontal: un doble tejido de trenzas y alambres entre los cuales se sitúa el plástico de cubierta. Las trenzas de cubierta son tensadas durante la construcción del invernadero, dotando al mismo de una elevada resistencia frente a cargas de viento, debido al reparto de los esfuerzos generado.

A.1. Parral plano

Invernadero Almería cuya cubierta es plana y el plástico del cerramiento de la cubierta está perforado para evacuar el agua de lluvia. En este tipo de invernadero las direcciones transversales y longitudinales son intercambiables (Figura 8).



Figura 8. Invernadero parral plano. Fotografía detalle interior

Este tipo de invernadero constituye el origen del sistema agrícola almeriense bajo plástico, y de su evolución y mejora ha surgido la estructura del invernadero “Raspa y Amado”

Los elementos estructurales más característicos de este tipo de invernaderos son:

- Pilares centrales y pies perimetrales de redondo de madera macizos

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

- Tejido superior e inferior (tenso- estructura horizontal): trenzas de acero galvanizado de 3x3 mm y 3x2 mm (locas); y alambre dulce de 2 mm para la conformación de los tejidos.

Las dimensiones más habituales son una altura por debajo de los 2 m que conforma un techo plano, sin pendientes en la cubierta.

Para evitar el colapso de la estructura como consecuencia de embalsamientos de agua de pluviales, el plástico de cubierta se instala perforado, por lo que la estanqueidad frente a la entrada de plagas y el control de las variables climáticas es muy deficiente. Si bien, tal y como se ha detallado, sigue representando un alto porcentaje de las estructuras presentes en el campo Almeriense, esta estructura se considera obsoleta por las deficiencias detalladas y otras adicionales.

Debido a la lividez de la estructura y a la configuración plana de la cubierta no es susceptible de albergar una instalación para la producción fotovoltaica en cubierta.

A.2. Raspa y Amagado

Invernadero Almería formado por módulos a dos aguas adosados cuyos módulos interiores presentan simetría con respecto a la cumbrera, y los módulos extremos, suelen ser asimétricos.



Figura 9. Invernadero Raspa y Amagado en construcción

Los elementos estructurales más característicos de este tipo de invernaderos son:

- Tejido superior e inferior (tenso- estructura horizontal): trenzas de acero galvanizado de 3x3 mm y 3x2 mm (locas); cable de acero de 8 mm para el cerco y alambre dulce de 3 mm para la conformación de los tejidos.
- Vigas IPN – 120 para apoyos perimetrales unidas por ángulo perfil L60 de acero galvanizado
- Tubos huecos de 60x 2,5mm para los apoyos interiores

Las dimensiones más habituales en los invernaderos comerciales construidos en la provincia son:

- Altura de banda, de 3 a 6 metros
- Altura de cumbrera (Raspa), de 4,2 a 7 metros
- Altura de amagado de 2,8 a 4 metros

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

- Pendiente de cubierta entre 6 a 20°
- Ancho de capilla, de 8 a 10 metros

Esta tipología de invernadero, como evolución del invernadero parral tradicional de Almería, ha experimentado en sí mismo una evolución en los últimos años, incrementando el volumen útil de la estructura (gracias al incremento de la altura de banda y cumbrera), su estanqueidad y la superficie de ventilación.

La estructura de este invernadero ha ido evolucionando asimismo en cuanto a materiales estructurales y método constructivo, con un excelente comportamiento frente a cargas como el viento, debido al reparto de esfuerzos generado por los tejidos de la tenso- estructura.

Sin embargo, frente a cargas de compresión, como eventos climáticos de granizo o nieve, esta estructura ha demostrado no estar preparada para cargas de compresión, generándose colapsos de estructuras como los recientemente acaecidos en la provincia de Almería, en el municipio de Níjar, en el mes de enero de 2020, donde más de 500 ha de invernadero fueron derrumbadas y un agricultor perdió la vida.



Figura 10. Colapso de Invernadero tipo Almería por carga de granizo. Almería, enero 2020. Fuente: La Voz de Almería

La estructura y materiales constructivos utilizados han sido resultado, más de la experiencia constructiva, que de un proceso de diseño y cálculo desde el punto de vista de la ingeniería con la consideración de las cargas estructurales habituales en el diseño y dimensionamiento de estructuras.



Figura 11. Colapso de Invernadero tipo Almería por carga de granizo. Almería, enero 2020.
Fuente: La Voz de Almería

Si bien, aun a pesar de diversos esfuerzos por introducir cálculos de esta estructura frente a las cargas estructurales dictaminadas por normativas como el Código Técnico de la Edificación y normas de referencia como la UNE 13031-1:2001 (Viento, carga de cultivo, nieve, granizo, carga de mantenimiento,...), la tipología de materiales utilizados, el alto grado de especialización de la mano de obra durante la construcción y el encarecimiento de las estructuras que conllevaría la aplicación de estas normativas, han frenado la estandarización y cálculo de este tipo de estructuras.

La instalación de paneles solares fotovoltaicos sobre este tipo de estructuras es, a priori, viable considerando el uso de materiales flexibles de bajo peso, y ha sido implementando en experiencias de investigación y comerciales en la provincia de Almería.

A.3. Asimétrico

El invernadero asimétrico es una variante del invernadero Raspa y Amagado (Valera et al, 2017), en el que la inclinación de cubierta se modifica para incrementar la captación de energía solar, formando módulos a dos aguas adosados cuyos módulos interiores presentan asimetría con respecto a la raspa o cumbre. En este subtipo, la altura de la raspa varía de 3 a 5 m, y la del amagado de 2,3 a 3 m. La altura de las bandas varía entre 2,15 y 3 m.

Los materiales utilizados en la construcción de este tipo de invernaderos son los mismos que en los invernaderos tipo Almería. Este invernadero tiene una escasa representatividad en la provincia.

La viabilidad de instalación de cubiertas fotovoltaicas sobre este tipo de estructura dependería del tipo de materiales constructivos utilizados, pero siempre considerando materiales de bajo peso como las láminas flexibles.

B. INVERNADERO MULTITÚNEL

El invernadero multitúnel se caracteriza por ser una estructura de mayor solidez y estabilidad, y por la forma semicircular de su cubierta (Figura 12). Este invernadero también puede presentar una variante, denominada ojival, en el que la forma de la cubierta se termina en forma apuntada, mejorando la pendiente de la cubierta de cara a la captación de radiación e incrementando el volumen de aire y la inercia térmica del invernadero con este sencillo cambio.

En ambos casos, su estructura, completamente metálica, proporciona una mayor resistencia frente a cargas de cultivo y climatológicas, dimensionadas según los estándares de la normativa UNE 13031-1:2001.

La estanqueidad y el volumen útil de la estructura, proporcionan una mejora de las condiciones ambientales y protección frente a la entrada de plagas del exterior, así como una mayor superficie de ventilación.



Figura 12. Invernadero multitúnel semicircular (izq.) y ojival (dcha.)

Los materiales habitualmente utilizados son:

- Pilares de acero galvanizado en caliente R-100 mm x 50 mm x 2-3 mm
- Perfiles tubulares galvanizados en sendzimir con secciones de 60 mm en arcos, 25-40 mm en elementos de la cercha (tirantes, pendolones y tornapuntas)
- Canales de 2-3 mm de sección de acero galvanizado y correas de cubierta y laterales para taqueo del plástico

Las dimensiones habituales en este tipo de estructuras son:

- Ancho de la nave: 8 m – 9,60 m
- Altura bajo canal: 4,5 m -5 m – 6 m

Este tipo de estructuras, por la forma semicircular de la cubierta, dificultan la instalación de paneles fotovoltaicos, aunque existen algunas experiencias de integración en invernaderos experimentales bien con paneles flexibles o con estructuras auxiliares.

C. INVERNADERO TIPO VENLO

El invernadero tipo Venlo o invernadero de cristal es la estructura tipo usada en el Norte de Europa, donde las frías temperaturas del invierno hacen necesario el uso de este tipo de estructuras. Poseen una sólida estructura metálica con cubiertas de 22° de pendiente. Su elevado precio, y la benignidad de las condiciones climáticas en Almería hacen que su representatividad sea escasa, no obstante, se pueden observar este tipo de invernaderos tanto en centros de investigación como en explotaciones comerciales.



Figura 13. Invernadero tipo Venlo (Valera et al, 2017)

Esta tipología de invernaderos presenta unas buenas condiciones para la instalación de placas fotovoltaicas en cubierta, tanto por los ángulos de cubierta utilizados como por la resistencia de la estructura a cargas en cubierta.

En este apartado hacemos mención al invernadero “SOLNOVA”, sobre el cual se han desarrollado los ensayos de la presente tesis.

Este invernadero fue diseñado y patentado por el equipo de investigación (Galera Quiles, M.C, López Díaz, G. y Villegas Oliva, M.M) del Centro Tecnológico TECNOVA bajo el marco del proyecto “Gestión Energética Integral de Sistemas de Cultivo bajo Invernadero”, financiado por la Consejería de Innovación Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía, bajo el Programa de incentivos de los Agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento y su convocatoria para el periodo 2008-2013 (Expte. 2009-26365).

El invernadero presenta una tipología multicapilla, recordando al diseño del invernadero Venlo, con cubierta plástica para plástico tricapa o láminas de policarbonato, habiendo sido diseñado y calculado para las condiciones de Almería según las determinaciones de la norma UNE 13031-1:2001, considerando la carga de placas fotovoltaicas en cubierta.

La concentración de invernaderos en Almería, con 32.048 ha, ha hecho que nuestra provincia sea conocida por ser la mayor concentración en superficie de invernaderos de plástico, habiendo originado “*El mar de plástico*”.

Esta gran superficie invernada puede presentar un potencial para su aprovechamiento como cubiertas fotovoltaicas, compatibilizando la producción fotovoltaica con la producción energética. La evaluación de los efectos del sombreado derivado de la instalación de placas solares en cubierta sobre la producción y calidad del tomate, como cultivo representativo, es objeto de esta tesis.

Dentro de las estructuras presentes en la provincia, la más representativa, el invernadero Raspa y Amagado podría albergar placas fotovoltaicas flexibles en cubierta, caracterizadas por su bajo peso. El uso de placas fotovoltaicas convencionales, no sería viable debido a la debilidad de la estructura hacia cargas en compresión.

En el caso de invernaderos multitúnel la adaptación a la forma semicircular de la cubierta demanda el uso de placas flexibles o estructuras portantes independientes para albergar las placas. En tal caso, el cálculo de los perfiles estructurales debe ser revisado para soportar esta nueva carga sobre la cubierta.

Los invernaderos multicapilla, como el invernadero Venlo o de cristal, o el invernadero SOLNOVA sobre el que se ha desarrollado esta tesis, son los que a priori presentan mejores condiciones para la integración de placas solares en cubierta, tanto por la resistencia de la estructura como por la inclinación de las cubiertas. No obstante, la resistencia estructural es un punto a considerar en cada caso particular.

2.3. Demanda Energética de los invernaderos

La instalación de paneles solares fotovoltaicos en cubierta puede responder a aplicaciones de autoconsumo o a la venta de los kWh producidos para obtener ingresos económicos complementarios. Las motivaciones para la instalación dependerán de la demanda energética de la explotación concreta y de la situación legislativa, que posibilite la venta de energía a la red general en condiciones competitivas. En la actualidad, en España, tras la eliminación del polémico “impuesto al sol”, establecido en el Real Decreto 900/2015, los Reales Decretos 15/2018 y RD 244/2019 regulan las instalaciones conectadas a red, reconociendo los derechos de autoconsumo y autoconsumo compartido, así como la inyección de energía excedente, en su caso a la red general. En el apartado 2.5, se analiza la situación legislativa actual.

El autoconsumo en invernaderos de la provincia de Almería podría ser viable debido a los bajos requerimientos energéticos de la mayoría de las explotaciones, y en algunos casos, la existencia de explotaciones aisladas de la red general.

La demanda energética de los invernaderos depende del nivel de integración tecnológica del mismo. (Yano y Cossu, 2019) han recopilado recientemente la demanda energética en invernaderos en diferentes regiones geográficas. Esta recopilación ha sido compilada y completada con otros estudios en la (Tabla 1), donde se puede consultar el **consumo eléctrico por hectárea** de las instalaciones y equipamientos más habituales en los **invernaderos del área mediterránea** en general, utilizando aquellos estudios en los que se han realizado **medidas sobre invernaderos con una superficie mínima de 400 m²**.

La demanda energética de los invernaderos y la gestión de la misma a través de los sistemas activos y pasivos de control de clima ha sido analizada por varios autores, con conceptos como el invernadero cerrado (Vadiee y Martin, 2012) y semicerrado (Qian et al, 2011) así como sus efectos sobre la producción del cultivo.

Asimismo, la influencia del tipo de estructura es relevante para la eficiencia energética y la compatibilidad de la producción fotovoltaica. (Djevic y Dimitrijevic, 2009) compararon la influencia del tipo de estructura de invernadero en la eficiencia energética de la producción de lechuga de invierno en la región de Serbia. Para la comparación 4 tipos de estructura con cubierta de plástico doble fueron estudiadas: dos macro- túneles con alturas de cenit de 3,2 m y 3,85 m, y dos estructuras de invernadero industrial con naves de altura máxima 4 m y 4,8 m respectivamente. Las estructuras de invernadero industriales demostraron un menor consumo energético frente a las estructuras tipo túnel.

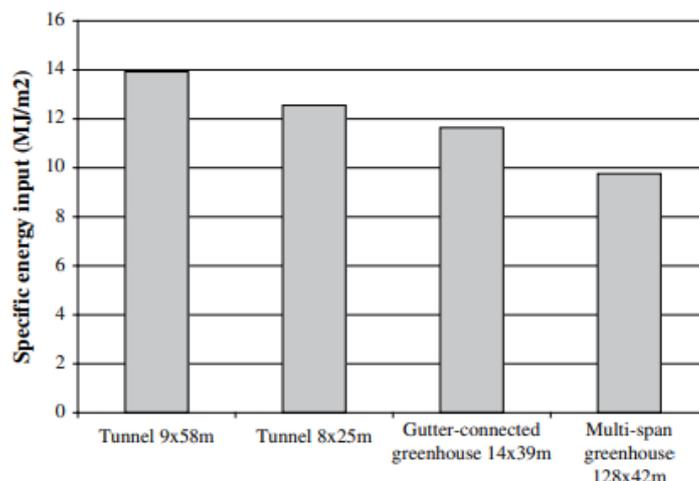


Figura 14. Consumo energético específico por invernadero
Fuente: (Djevic y Dimitrijevic, 2009)

(Mohammadi y Omid, 2010) estudiaron el consumo energético de la producción de pepino en Irán en un ciclo de primavera, a través de encuestas directas a 43 agricultores. Se cuantificó un balance energético total de 148.836,76 MJ/ha, siendo las principales contribuciones el consumo el diésel (41,94%), los fertilizantes químicos (19,69%) y la electricidad usada en las explotaciones (19,55%). De manera generalizada, los invernaderos mediterráneos, gracias a la benignidad del clima y a la escasa incorporación de equipos de control activo del clima como calefacción o cooling system, presentan una demanda energética media- baja, con respecto a otras zonas de cultivo tradicional como Holanda, Francia o Canadá.

Este hecho fue caracterizado por (Valera et al, 2017), recopilando estudios de **Análisis de Ciclo de Vida** y comparando los requerimientos globales de energía en invernaderos sin calefacción en Almería, con otras zonas de climas más adversos que utilizan de manera habitual sistemas de calefacción, resultando del orden de 8 a 32 veces superior la Demanda Energética Global con respecto a los invernaderos en Almería (Figura 15).

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Country	Greenhouse type	P	GER	C	GWP	ADP	AAP	EUP	POP	W
Spain	Plastic multi-span	16,5	4,0		0,25	1,7	1,0	0,49	0,054	28,8
Holland	Glass <i>Venlo</i> with heating	56,5	30,9	31,0	1,93	14,7	3,2	0,85	0,215	14,1
Holland	Glass <i>Venlo</i> with cogeneration	56,5	5,0		0,84		1,3	1,85	0,241	
Holland	<i>Venlo</i> with cogeneration and lighting	76,5	11,9	39,0	1,18		1,6	1,97	0,092	
France	Tunnel with plastic cover	14,6	5,2		0,51		1,4		0,850	34,2
France	Plastic multi-span with heating	44,0	31,6		2,02		3,4		0,460	28,4
France	Glass with heating	44,0	31,3	85,3	2,01		3,4		0,447	28,4
Italy	Plastic	9,6	16,2		0,74		5,7	2,10	0,300	88,9
United Kingdom	Glass with heating		130,0		9,40	100	12,0	1,50		39,0
Switzerland	Glass with heating		42,0		3,30					
Canada	Plastic with heating	56,4	52,7	88,0	2,88					

P: production [kg/m²].

GER, Global Energy Requirement [MJ/kg].

C, percentage of requirements related to heating [%].

GWP, Global Warming Potential [kg CO₂ eq/kg].

ADP, Abiotic depletion [kg Sb eq/t].

AAP, Air acidification [kg SO₂ eq/t].

EUP, Eutrophication [kg PO₄⁻³ eq/t].

POP, Photochemical oxidation [kg C₂H₄ eq/t].

W, water requirements [m³/t].

Source: ^aTorrellas *et al.* (2012); ^bTorrellas *et al.* (2013); ^cvan Zundert (2012); ^dBoulard *et al.* (2011); ^eCellura *et al.* (2012); ^fWillinas *et al.* (2006); ^gCarlsson-Kanyanma (1998); ^hHendricks (2012).

Figura 15. Valores de producción de tomate en diferentes países y tipos de invernadero. Fuente: (Valera et al, 2017)

Los niveles de Demanda Energética Global (GER: Global Energy Requirements) y Demanda Energética Acumulada (CED: Cumulative Energy Demand), son parámetros utilizados por los estudios de Análisis de Ciclo de Vida, que contemplan la suma de energía de los diferentes inputs asociados a la producción, gestión, infraestructuras, bienes de capital, procesado, transporte y distribución del producto analizado.

Estudios realizados sobre los invernaderos de Almería, referencian unos valores de 2011*10³ MJ/ha en invernaderos multitúnel de tomate con calefacción y 374*10³ MJ/ha sin calefacción (Pérez- Neira et al, 2018).

El avance en las tecnologías de producción asociadas al cultivo en invernadero para incrementar la productividad y rentabilidad de los sistemas de cultivo como sistemas de riego y fertilización localizados, calefacción, refrigeración, control de humedad, iluminación LED, etc. han hecho incrementar la demanda energética de los invernaderos.

No obstante, los invernaderos de la provincia, se caracterizan por un bajo consumo energético. Como referencia podemos observar el gasto energético medio por hectárea, el cual se situó durante la campaña 2018/2019 en 1.302 € por hectárea (Cajamar, 2019).

La **demanda energética de los invernaderos** en la provincia de Almería se caracteriza por la **escasa potencia demandada**, debido a la simplicidad tecnológica del conjunto de los invernaderos, donde los mayores consumos se deben a los sistemas de bombeo de agua y a los motores para la apertura y cierre de ventanas.

El consumo eléctrico demandado se encuentra en torno a los 15.000 – 30.000 kWh anuales por hectárea.

Estas características de invernaderos de bajo consumo energético, representan, a priori, un potencial para cubrir con energía fotovoltaica la demanda del invernadero, mejorando la cuenta de explotación del agricultor y disminuyendo la huella de Carbono de los productos de Almería.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Lugar	Superficie del invernadero	Cultivo	Temporada /Duración del cultivo	Usos de la electricidad	Energía eléctrica demandada	Energía eléctrica demandada (media diaria Wh m ⁻² d ⁻¹)	Referencia
Grecia	500 m ²	No descrito	365 d (anual)	Calefacción, Ventilación, cooling system, e iluminación artificial	71,6 KWh m ⁻² year ⁻¹	196	Souliotis et al,2006)
Grecia	500 m ²	No descrito	365 d (anual)	Ventilación, cooling system, e iluminación artificial	19,8 KWh m ⁻² year ⁻¹	54	Souliotis et al,2006)
España (Almería)	1.024 m ²	Tomate	232 d Sept-May	Ventilación y bomba de riego por goteo	4 kWh m ⁻² 232 d ⁻¹	17,24	(Ureña-Sánchez et al, 2012)
España (Almería)	877 m ²	Tomate	200 d Oct-May	Ventilación, sistema de riego, pantalla de sombreo, enriquecimiento CO ₂	0,241 kWh * (877 m ⁻²)* d ⁻¹ media 4,3 kWh* (877 m ⁻²)* d ⁻¹ maximo	0,27 media 4,90 max	(Hernández et al, 2015)
España (Almería)	432 m ²	Habichuela verde	126 d Nov-Marzo	Calefacción por aire	120- 250 MJ*m ²	264- 551	(López et al, 2006)
España (Alicante)	22.536 m ²	Pimiento	365 d (anual)	Ventilación, fertirrigación, quemador calefacción, pantalla, control clima, compresor tratamientos	150.000 kWh	18,25	(Rocamora y Tripanagnostopoulos, 2006)

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

ffffLugar	Superficie del invernadero	Cultivo	Temporada /Duración del cultivo	Usos de la electricidad	Energía eléctrica demandada	Energía eléctrica demandada (media diaria Wh m ⁻² d ⁻¹)	Referencia
Área mediterránea	-	-	Anual	Invernadero con control climático (Calefacción, ventilación, cooling)	90.000 kWh* ha ⁻¹	25	(Campiotti et al, 2008)
Área mediterránea	-	-	Anual	Invernadero de baja tecnología	20.000 kWh*ha ⁻¹	5	(Campiotti et al, 2008)
Irán	2.800 m ² promedio	Pepino	No descrito	Invernadero	2438,74 kwh*ha ⁻¹		(Mohammadi y Omid,, 2010)

Tabla 1. Resumen de las demandas energéticas de invernaderos en el área mediterránea

2.4. Evolución de las tecnologías de producción fotovoltaica, materiales, eficiencia y precios para su aplicación en invernaderos fotovoltaicos.

La evolución de la tecnología fotovoltaica, el incremento de su eficiencia y la disminución de precios ha posibilitado en los últimos años una rápida expansión del uso de la fotovoltaica en diferentes aplicaciones.

El principio básico de la fotovoltaica es la conversión de la luz del sol (fotones) en electricidad, gracias a las células fotovoltaicas. Las células fotovoltaicas son simples estructuras de diodos semiconductores diseñadas y construidas para absorber y convertir eficientemente la energía de radiación solar en energía eléctrica (Benda, 2018).

Las características de las células fotovoltaicas dependerán de los materiales de fabricación, del tipo de conexión (en serie o en paralelo). De manera general podemos establecer las siguientes tipologías:

- Células de silicio cristalino, las más comúnmente utilizadas en el mercado de la fotovoltaica
- Células Orgánicas o Thin-Film, también muy utilizadas y ensayadas en la aplicación de invernaderos debido a su menor peso y flexibilidad. En este caso el material semiconductor utilizado en su fabricación es el Teluro de Cadmio y Deselenuro de Cobre, Indio y Galio.
- Células III-V. Estas células de última generación usan elementos del grupo III (galio e indio) y grupo V (Arsénico, antimonio) de la tabla periódica. Son de elevado precio pero alta eficiencia y suelen usarse en aplicaciones como satélites, o vehículos aéreos no tripulados.
- Nueva generación de células solares: quantum dots, y materiales híbridos (orgánicos-inorgánicos: Perovskite)

Las células de silicio cristalino y las orgánicas o Thin-film, que permiten la configuración de placas semi-transparentes, son las más usadas en las aplicaciones de invernadero. Sin embargo, autores como (Harjunowibowo et al, 2018), han documentado estudios de ***diversos autores que ponen de relevancia que la eficiencia de los paneles fotovoltaicos disminuye marcadamente por el exceso de calor que se genera en el ambiente del invernadero.*** (Pandey et al, 2016) revisaron la eficiencia de las diferentes tipos de células, incluyendo las tradicionales y los nuevos materiales disponibles en el mercado (Tabla 2), aquí podemos observar las significativas diferencias entre unos modelos y otros.

Clasificación	Eficiencia (%)
Células de Silicio	
Si (cristalino)	25,6 ± 0,5
Si (Multicristalino)	20,8 ± 0,6
Si (thin transfer submodule)	21,2 ± 0,4
Si (Thin fil minimodule)	10,5 ± 0,3
Células III-V	
GaAs (thin film)	28,8± 0,9
GaAS (multicristalino)	18,4± 0,5
InP (cristalino)	22,1± 0,7
Células Thin Film calcogenuras	
CIGS (célula)	20,5± 0,6
CIGS (minimodulo)	18,7± 0,6
CdTe (Célula)	21,0± 0,4
Silicio amorfo/ microcristalino	
Si (amorfo)	10,2± 0,3
Si (microcristalino)	11,4± 0,3
Dye sensitized (tinte fotosensible)	
Dye	11,9± 0,4
Dye (minimodulo)	10,0 ± 0,4
Dye (submodulo)	8,8± 0,3
Orgánicas	
Organic thin-film	11,0± 0,3
Ornic (minimodule)	9,5± 0,3

Tabla 2. Eficiencia de las células fotovoltaicas disponibles en el mercado según el material. Fuente: (Pandey et al, 2016)

La constante evolución de la tecnología hace que cada año se actualicen las eficiencias tanto de las células como de los módulos, en la (Figura 16) y (Figura 17) podemos ver la situación actual de cada una de las tecnologías, publicadas en el Informe Anual de Fotovoltaica del Instituto Fraunhofer de Alemania.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

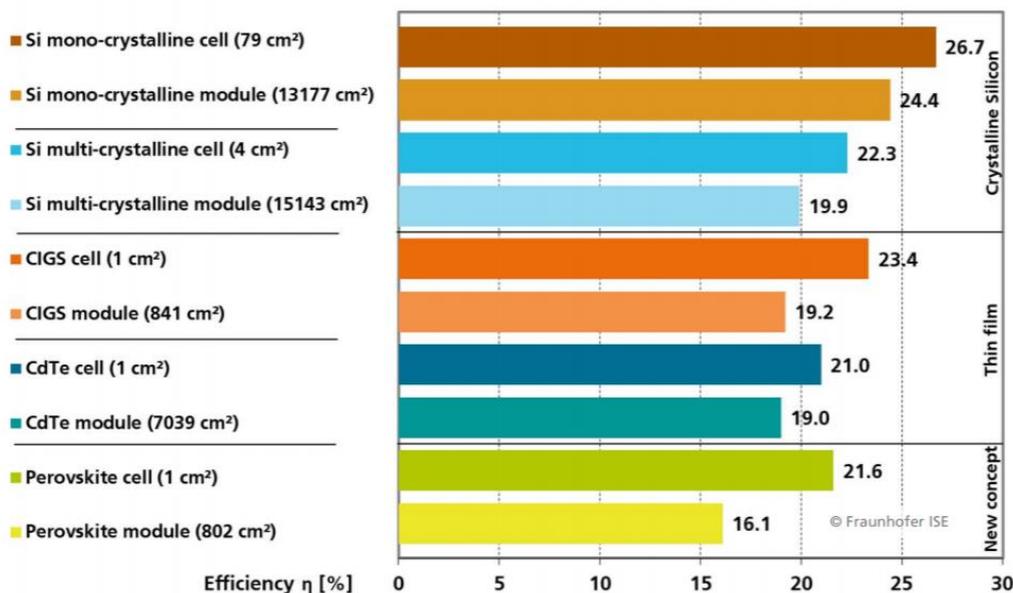


Figura 16. Comparación de eficiencia entre tecnologías. Fuente: (Philipps, 2020)

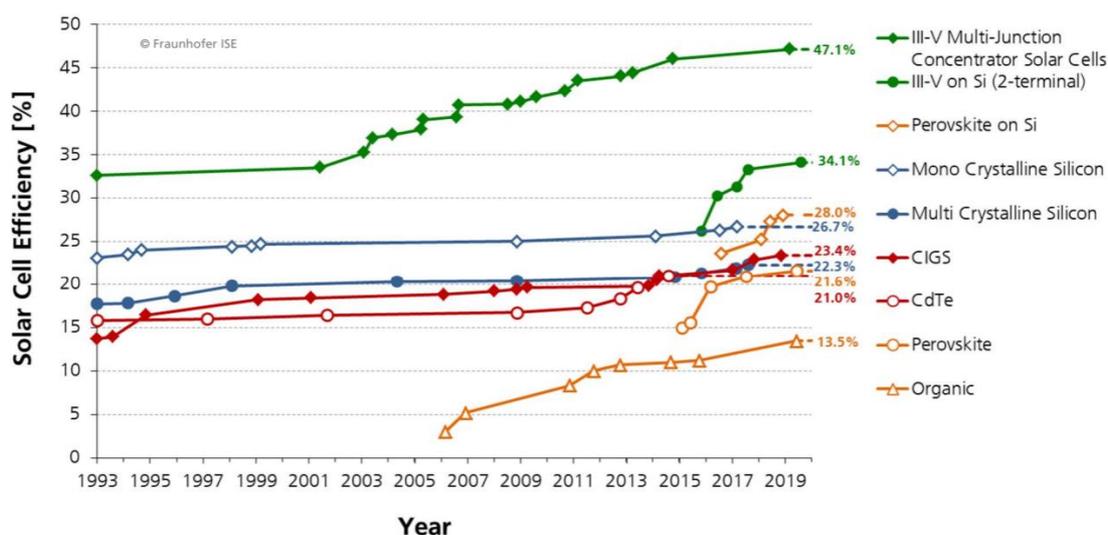


Figura 17. Evolución de la eficiencia en condiciones de laboratorio de las diferentes tipos de células fotovoltaicas. Fuente: (Philipps, 2020)

En el ámbito de la aplicación a los invernaderos fotovoltaicos, en la (Tabla 3) se puede consultar como los diferentes ensayos realizados referentes a invernaderos fotovoltaicos han utilizado las dos primeras tipologías, que se diferencian significativamente por la eficiencia de conversión en energía eléctrica de los paneles.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Autor	Tipo de modulo	Eficiencia de los módulos	Potencia nominal modulo	Superficie fotovoltaica	Orientación EJE INVERNADERO	% sombreado cubierta	Producción eléctrica ANUAL		
Cossu, et al, 2014	Silicio monocristalino	14,2 % 11,4% real	235 W	475 m ²	E-W	50%	107.885 kWh anuales		
Cossu, et al, 2018	Silicio monocristalino	14,20%	235 W	495 m ²	N-S E-W	100%	93.748 kWh anuales 109.036 Kwh anuales		
		14,20%	235 W	300 m ²	N-S E-W	60%	60.652 kWh anuales 73.416 kWh anuales		
		14,20%	235 W	248 m ²	N-S E-W	50%	46.438 kWh anuales 54.755 kWh anuales		
		15,20%	205 W	129 m ²	N-S E-W	25%	25.956 kWh anuales 30.596 kWh anuales		
		Aroca-Delgado et al, 2019	Silicio amorfo, thin film	3,67 - 4,18% (*R)	92 W	18,8 m ²	E-W	9,80%	5,70 - 6,40 kWhm-2
		Moretti y Marucci, 2019		1,9 % - 4,9% (*R)		8,15 m ²	E-W		1,44 MJ m-2 d-1
Yano, et al., 2009	Silicio amorfo, thin film	7%	24 W	5,6 m ²	N-S	5,10%	450 MJ /año		
Yano, et al., 2010	Silicio amorfo, thin film	7%	24 w	10,33 m ²	E-W	10,70%	28,7 MJ/año/m2		
Ezzaeri, et al., 2018	Monocristalino back contact, thin-film	19%	100	16 m ²	N-S	10%	(*) PENDIENTE DE PUBLICACION		
Marucci et al, 2018	Monocristalino back contact, thin-film	18%	20 W		E-W				

Tabla 3. Resumen de parámetros de eficacia y características en invernaderos fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia, varios autores

Las **placas con células orgánicas o thin-film**, han sido ampliamente utilizadas para ensayos y aplicaciones en invernaderos, gracias a sus características de bajo peso y versatilidad para su adaptación a las características de la cubierta. Entre los estudios realizados podemos destacar:

(Marucci et al, 2012) evaluaron tres muestras de film fotovoltaico semitransparente, en sus fases iniciales de desarrollo experimental, como potencial para su uso en invernaderos mediterráneos- El análisis espectral concluyó que la transmitancia de los films analizados era muy baja con respecto a la cubierta plástica de EVA tradicional. Este hecho limitaba la fotosíntesis de la planta. Sin embargo, en el espectro del infrarrojo, los films semi-transparentes presentaban una transmitancia nula, lo que confiere ventajas para alcanzar el efecto invernadero deseado.

(Emmott et al, 2015) evaluaron el potencial de los materiales orgánicos fotovoltaicos (OPV) para sus aplicaciones en invernadero, presentando una amplia revisión de los diferentes materiales y polímeros de banda baja y sus características. La evaluación del potencial se basó en modelos de crecimiento de cultivo, la absorción y transparencia de cinco polímeros y el análisis económico de rentabilidad de los mismos. El análisis económico realizado sugiere valores mínimos de eficiencia de los módulos requerida del 10,2% para los costes de fabricación estándar fijados en 40 €/m², muy lejos de la eficiencia de las células orgánicas, por lo que más investigación y desarrollo es demandada en este ámbito. La electricidad generada se estimó para radiaciones tipo de 2.200 y 1.300 kWh/m². En la Figura 18 observamos las grandes diferencias en eficiencia y producción eléctrica de los materiales analizados.

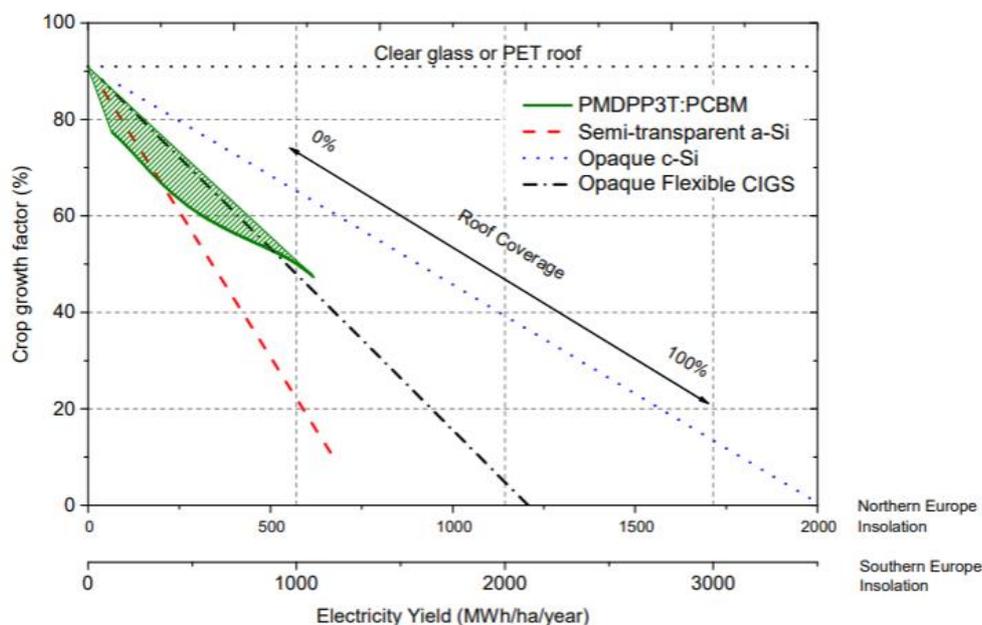


Figura 18. Electricidad generada versus impacto en el crecimiento del cultivo. Fuente: (Emmott et al, 2015)

Sin embargo, los **Módulos Fotovoltaicos Orgánicos semi-transparentes**, evaluados para su uso como cubierta de invernaderos o sistema de sombreo, se presentan en dimensiones insuficientes para servir como material de cubierta y el espectro de radiación PAR que transmiten (del 22 al 26%) es relativamente bajo para las aplicaciones de invernadero. Adicionalmente la **eficiencia eléctrica en condiciones de campo fue del 2 al 2,6%** (Friman Peretz et al, 2019), de un 3,67% a 4,18 % en el caso de (Aroca-Delgado et al, 2019) y en el mejor de los casos una eficiencia del 7% en las placas evaluadas por (Yano et al, 2009) y (Yano et al, 2010).

Con **la evolución de la tecnología y la aparición de nuevos materiales**, estos nuevos módulos están siendo asimismo implantados en los ensayos en invernadero:

(Yano et al, 2014) realizaron un ensayo con dos prototipos de módulos fotovoltaicos bifaciales y semitransparentes que utilizan **micro-células solares esféricas** con diferentes densidades (15,4 frente a 5,1 células /cm²). **La eficiencia de conversión de energía eléctrica generada fue de 4,5% y 1,6% respectivamente**. Los cálculos de energía eléctrica generada por unidad de superficie del invernadero de estos módulos demuestran que pueden ser viables para invernaderos en zonas de elevada radiación donde la producción puede ser alta y la demanda baja.

(Roslan et al, 2018) pusieron de manifiesto el uso de Nuevos materiales como el caso de las Celdas Solares Graetzel, *Dye Sensitized Solar Cells* (DSSC), las cuales se presentan como una tecnología de fabricación barata y con características atractivas como flexibilidad, transparencia y sensibilidad a niveles bajos de luz.

(Luca La Notte et al, 2020) han realizado una revisión de la aplicación en invernaderos de sistemas fotovoltaicos híbridos y orgánicos. Los datos revisados han permitido comparar la producción eléctrica con el ratio de cobertura y el tipo de tecnología fotovoltaica usada. Así, afirma que la producción eléctrica se incrementa prácticamente según una función lineal con el % de cobertura (1,7 kWh*m⁻²*año⁻¹ por cada 1% anual de cobertura). Los mayores rendimientos, son obtenidos con células de silicio monocristalino, aunque no obstante la aparición de nuevas tecnologías como las orgánicas, dye-sensitized y las células perovskite presentan potencial por su bajo coste de fabricación, sus características semi-transparentes. En el caso de las células orgánicas, su integración en materiales flexibles hace posible su compatibilización en materiales de cubierta plásticas, y en el caso de las dye-sensitized, son más viables en soportes rígidos como el cristal. Las células Perovskite, presentan un gran potencial derivado de la alta eficiencia que presenta, pero por ahora su aplicación en invernaderos es escasa.

Especial mención en este sentido, merecen los trabajos de (Ezzaeri et al, 2018) y (Marucci et al, 2018), con el uso de **células monocristalinas back contact, thin-film**, que aúnan las ventajas de versatilidad y bajo peso de las thin-film tradicionales y unas **eficiencias mejoradas sobre el 20%**.

Evolución de los precios de instalación de paneles fotovoltaicos.

La tecnología fotovoltaica ha experimentado una gran evolución en las últimas décadas, tanto en mejora tecnológica y de eficiencias como en reducción de los precios de producción e instalación. Según (ANPIER, 2019), “la evolución del precio del módulo fotovoltaico de panel plano, refleja un claro y continuado descenso de costes, habiendo caído un 89% desde el año 2007, a causa del desarrollo y la evolución de esta tecnología”.

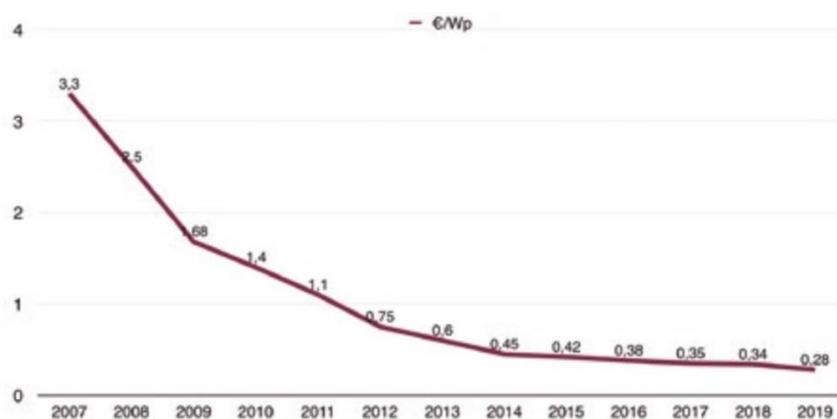


Figura 19. Evolución del precio del panel solar (€/Wp). Fuente (ANPIER, 2019)

Esta disminución en los precios de fabricación e instalación, ha posibilitado que el coste medio de la energía producida (LCOE, *Levelized Cost of Electricity*) en España, para grandes plantas fotovoltaicas se situara en 2019 en torno a 0,087 USD kWh (IRENA, 2020). Este precio es competitivo frente a fuentes tradicionales tanto renovables (hidroeléctrica, eólica) como no renovables (carbón, gas y nuclear).

La disminución del precio y los incrementos de eficiencia no han sido suficientes para establecer un mercado de generación fotovoltaica sólido en España, debido al freno que los diferentes marcos regulatorios han provocado a los inversores. Durante 2019, esta tendencia se ha roto a nivel nacional, habiendo experimentado un notable incremento (incremento del 89% de potencia instalada), registrando valores históricos tanto en potencia instalada como en generación (Figura 20). Esto ha hecho, que se sitúe como la tercera fuente renovable de generación eléctrica en España, con 11.217 MW de capacidad instalada a finales de año.

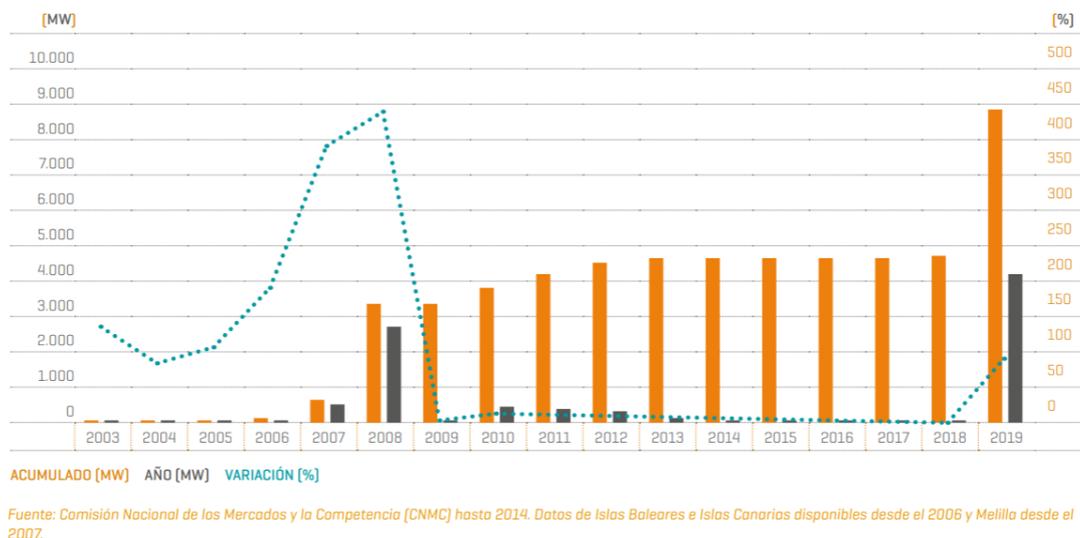


Figura 20. Potencia solar fotovoltaica instalada. Sistema eléctrico nacional.
Fuente: Red Eléctrica de España, 2019.

En instalaciones domésticas (techo residencial, instalaciones de autoconsumo),... los precios también han ido disminuyendo significativamente (82%, en el periodo 2010-2019), situándose en la actualidad en 0,104 USD/kWh para nuestro país (LCOE), siendo los costes totales de instalación del kWh, incluyendo los costes del equipamiento, la instalación y legalización, así como gastos de financiación y otros ingresos procedentes de subvenciones se sitúan en 1,41 USD/kWh en nuestro país para instalaciones domésticas (IRENA, 2020).

Los precios de instalación de los sistemas fotovoltaicos difieren significativamente en función de la potencia instalada y de la compañía suministradora seleccionada para la realización de la instalación. (Donoso, 2018), en el informe de la Agencia Internacional de la Energía para España en el año 2018, analiza con más detalle las diferentes tipos de instalaciones y sus costes asociados con datos de mercado de diferentes compañías instaladoras, considerando los módulos, los inversores, la instalación y permisos:

- Instalación doméstica de 5-10 kW. Costes desde 1,5€ - 2,02 €/Wp instalado.
- Instalación comercial de 10 -100 kW. Coste medio de 0,90 €/Wp instalado.
- Sistemas fotovoltaicos a gran escala por encima de los 20 MW. Coste medio de 0,72 €/Wp instalado.

La constante evolución y mejora de los materiales fotovoltaicos ha posibilitado la democratización de las instalaciones, con precios cada vez más económicos, siendo hoy en día accesibles al usuario doméstico.

Dentro de las tecnologías disponibles en el mercado, están surgiendo nuevos materiales de eficiencias mejoradas, aunque por ahora, en el caso de invernaderos, las tecnologías predominantes son las placas de silicio cristalinas y las células orgánicas (thin-film).

La eficiencia en la producción energética del sistema es de especial relevancia en el diseño y dimensionamiento del mismo, sobre en todo cuando los últimos estudios sugieren una pérdida de eficiencia del sistema debido a las altas temperaturas registradas en la cubierta del invernadero.

2.5. Situación legislativa en España

La regulación de las instalaciones de producción fotovoltaica en España es extensa y compleja. La normativa aplicable depende de si la instalación se encuentra aislada, SFA (Sistema Fotovoltaico Aislado) o conectada a la red general, SFCR (Sistema Fotovoltaico Conectado a Red).

Los SFA tienen una regulación sencilla, basado en la aplicación del Real Decreto 842/2002 donde se aprueba el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión.

En cuanto a los sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFCR), la legislación aplicable es bastante más complicada que las de los SFA y clasifica las instalaciones dependiendo de si tienen consumos eléctricos asociados y se ubican próximos a estos (**autoconsumo**) o sin están diseñadas exclusivamente para inyectar energía eléctrica a la red (**centrales fotovoltaicas**). La (Figura 21), recoge un resumen esquemático de las normativas básicas de aplicación en cada caso, dependiendo del destino de la instalación (Autoconsumo o central fotovoltaica) y la potencia instalada.

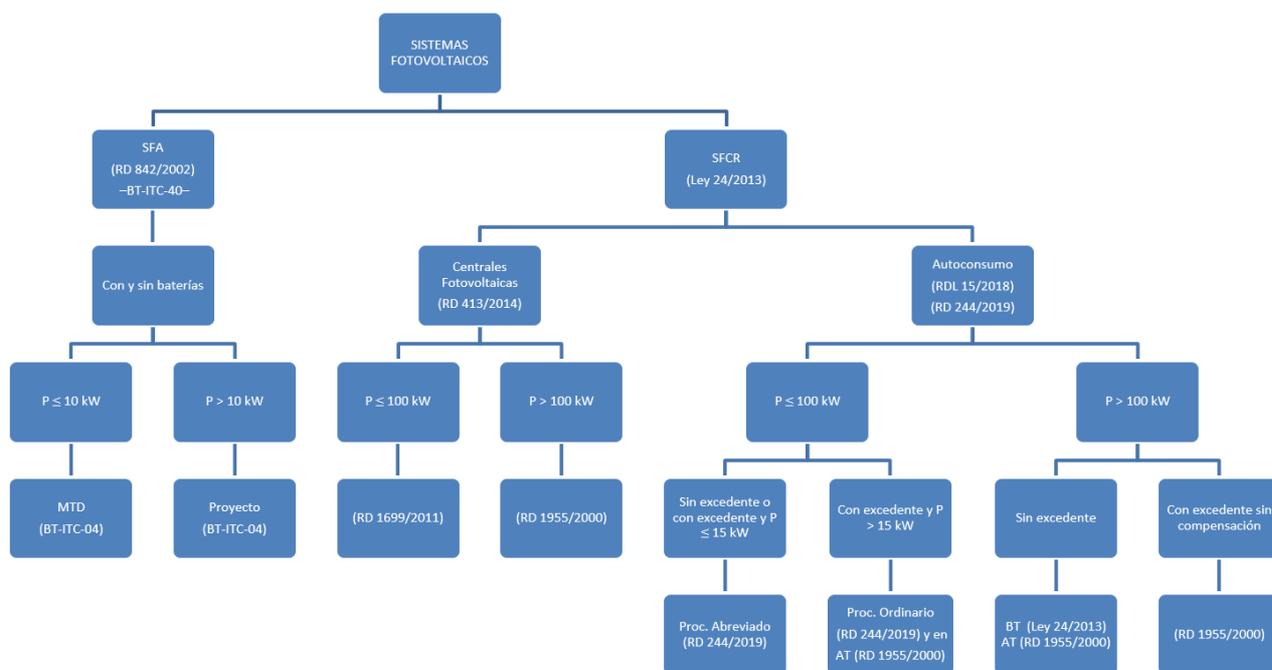


Figura 21. Resumen legislativo de la normativa de sistemas fotovoltaicos en España.
Fuente: Soría, 2019

Asimismo, en el Listado normativa autonómica, estatal y normas técnicas de aplicación en los proyectos de instalación fotovoltaica en España. se referencia el listado de normativa vigente autonómica, estatal y normas técnicas de aplicación en los proyectos de instalación fotovoltaica.

En el caso de invernaderos fotovoltaicos comerciales, nos podemos encontrar con todas las situaciones, desde invernaderos aislados de la red que necesitan la instalación fotovoltaica para suplir la demanda energética de los equipos, así como invernaderos comerciales conectados a la red que han encontrado en los sistemas fotovoltaicos una alternativa para el complemento energético y económico de su explotación.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Los sistemas aislados, con objeto de autoconsumo, se tramitan a través del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (RD 842/2002).

Los **sistemas conectados a red**, son regulados por el Real Decreto 244/2019, de 5 de abril. En Andalucía, la tramitación depende de la Secretaría General de Industria, Energía y Minas, la cual en su manual para la tramitación administrativa de este tipo de instalaciones (Junta de Andalucía, 2019) el cual contempla la siguiente tipología de instalaciones:

“Instalación conectada a la red: *Aquella instalación de generación conectada en el interior de una red de un consumidor, que comparte infraestructuras de conexión a la red con un consumidor o que esté unida a este a través de una línea directa y que tenga o pueda tener, en algún momento, conexión eléctrica con la red de transporte o distribución. También tendrá consideración de instalación de generación conectada a la red aquella que está conectada directamente a las redes de transporte o distribución.*

Las instalaciones desconectadas de la red mediante dispositivos interruptores o equivalentes se considerarán instalaciones conectadas a la red a los efectos de la aplicación de este real decreto. En el supuesto de instalaciones de generación conectadas a la red interior de un consumidor, se considerará que ambas instalaciones están conectadas a la red cuando o bien la instalación receptora o bien la instalación de generación esté conectada a la red.

*De acuerdo con lo previsto en el artículo 9.1 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, se entenderá por autoconsumo, el consumo por parte de uno o varios consumidores de energía eléctrica proveniente de instalaciones de producción próximas a las de consumo y asociadas a los mismos. **Se distinguen las siguientes modalidades de autoconsumo:***

1) *Modalidades de suministro con autoconsumo sin excedentes.* *Corresponde a las modalidades definidas en el artículo 9.1.a) de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre. En estas modalidades se deberá instalar un mecanismo antivertido que impida la inyección de energía excedentaria a la red de transporte o de distribución. En este caso existirá un único tipo de sujeto de los previstos en el artículo 6 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, que será el sujeto consumidor.*

2) *Modalidades de suministro con autoconsumo con excedentes.* *Corresponde a las modalidades definidas en el artículo 9.1.b) de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre. En estas modalidades las instalaciones de producción próximas y asociadas a las de consumo podrán, además de suministrar energía para autoconsumo, inyectar energía excedentaria en las redes de transporte y distribución. En estos casos existirán dos tipos de sujetos de los previstos en el artículo 6 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, que serán el sujeto consumidor y el productor.*

La modalidad de suministro con autoconsumo con excedentes, se divide en:

- a) **Modalidad con excedentes acogida a compensación:** *Pertenece a esta modalidad, aquellos casos de suministro con autoconsumo con excedentes en los que voluntariamente el consumidor y el productor opten por acogerse a un mecanismo de compensación de excedentes. Esta opción solo será posible en*

aquellos casos en los que se cumpla con todas las condiciones que seguidamente se recogen:

- *La fuente de energía primaria sea de origen renovable.*
- *La potencia total de las instalaciones de producción asociadas no sea superior a 100 kW.*
- *Si resultase necesario realizar un contrato de suministro para servicios auxiliares de producción, el consumidor haya suscrito un único contrato de suministro para el consumo asociado y para los consumos auxiliares de producción con una empresa comercializadora.*
- *El consumidor y productor asociado hayan suscrito un contrato de compensación de excedentes de autoconsumo.*
- *La instalación de producción no tenga otorgado un régimen retributivo adicional o específico.*

*b) **Modalidad con excedentes no acogida a compensación:** Pertencerán a esta modalidad, todos aquellos casos de autoconsumo con excedentes que no cumplan con alguno de los requisitos para pertenecer a la modalidad con excedentes acogida a compensación o que voluntariamente opten por no acogerse a dicha modalidad. Adicionalmente a las modalidades de autoconsumo señaladas, el autoconsumo podrá clasificarse en individual o colectivo en función de si se trata de uno o varios consumidores los que estén asociados a las instalaciones de generación”.*

Aun cuando no es objeto de la presente tesis la revisión normativa vigente de las instalaciones fotovoltaicas asociadas a invernaderos, si es reseñable citar que las novedades más significativas de los Reales Decretos 15/2018 y RD 244/2019, han eliminado el llamado “Impuesto al Sol”, reconociendo así el derecho al autoconsumo sin cargos y regulando el autoconsumo compartido.

La instalación de placas fotovoltaicas en cubierta para la producción energética en invernaderos se encuentra, de manera general, dentro de la normativa para instalaciones **por debajo de 100 kW**, debido al bajo consumo energético de los invernaderos en la provincia de Almería.

Dentro de las modalidades existentes, la presente tesis explora la viabilidad de una instalación de **autoconsumo acogida a compensación de excedentes** como alternativa de diseño para la mayor parte de los invernaderos existentes en la provincia.

Asimismo, **se considera la generación de escenarios con instalaciones fotovoltaicas con los % de sombreado contemplados en el ensayo (15%, 30% y 50%), donde la producción agrícola se vería afectada, así como un escenario del 10% de sombreado de cubierta**, donde según la bibliografía previa la producción agrícola no sería afectada. Estos escenarios al exceder de los 100 kW instalados, se encontrarían dentro de la modalidad de autoconsumo con excedentes sin compensación.

2.6. Resultados previos sobre % de sombreado en ensayos en invernaderos fotovoltaicos

La producción compatible de energía y alimentos de forma sostenible es una de las preocupaciones de la sociedad actual (Roslan et al, 2018) y (Yano y Cossu, 2019), debido a cuestiones como la crisis energética mundial por el agotamiento de energías fósiles y el cambio climático, siendo uno de los retos de la agricultura actual la búsqueda e implementación de fuentes de energía limpias y renovables. La generación de energía solar a través de fotovoltaica, es una de las opciones más viables, especialmente en los países tropicales, sin embargo, la competencia entre plantas y placas fotovoltaicas por el recurso sol, es la principal problemática encontrada.

Por ello, el uso de invernaderos fotovoltaicos ha sido y es, objeto de numerosas investigaciones. (Aroca-Delgado et al, 2018), recopilaron las publicaciones en la materia, compilando la información disponible en 113 artículos en la materia. El análisis realizado, señaló a Italia, España y Japón (Figura 22) como aquellos países con mayor producción científica en la temática.

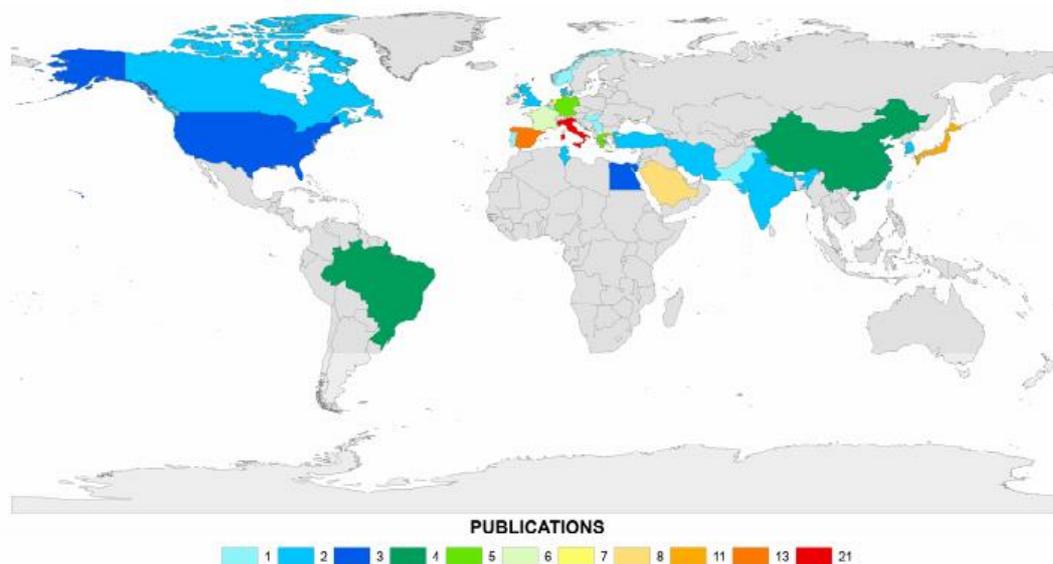


Figura 22. Publicaciones relativas a compatibilidad entre cultivo y paneles solares.
Fuente (Aroca-Delgado et al, 2018)

Los estudios se han abordado desde diferentes perspectivas:

- La producción de energía fotovoltaica en invernadero podría satisfacer las necesidades de energía de las explotaciones.
- Estudio de los sombreados producidos y la compatibilidad entre la producción agrícola y energética.
- Estudios socio-económicos.

1. La producción de energía fotovoltaica en invernadero podría satisfacer las necesidades de energía de las explotaciones.

(Al-Ibrahim et al, 2006), cuantificaron el potencial de un sistema fotovoltaico para suministrar energéticamente invernaderos, como vía de suministro a invernaderos aislados y desconectados de la red general en el desierto de Arabia Saudí. El sistema fotovoltaico de 14,7 kW con células solares HIT (silicio monocristalino con capas adicionales de silicio amorfo en ambas caras de la célula, procedimiento conocido como hetero-unión), en un invernadero de 9x39 m². El sistema de almacenamiento, fue capaz de suministrar la potencia eléctrica demandada por más de 100 horas, por lo que se consideró un sistema adecuado para zonas remotas.

(Marucci et al, 2013), identificaron, para las condiciones de Italia, el excedente de energía en relación a los requisitos de cultivos en invernadero que podría ser utilizado para la producción eléctrica, basándose en el uso de módulos fotovoltaicos flexibles y módulos semitransparentes. Los resultados exponen los excedentes y déficits energéticos a lo largo del año y la mejor combinación de ciclos de cultivo. Asimismo, se centra en el uso de láminas flexibles, ya que facilitarían la retirada en momentos de déficit de radiación por parte del cultivo, respecto a las placas fotovoltaicas tradicionales.

(Yano et al, 2007), desarrollaron un sistema de ventilación lateral para invernaderos suministrado por energía fotovoltaica, colocando un módulo de silicio amorfo de 0,078 m² con una potencia máxima de 3,2 y una batería de 28 Ah de capacidad (12 V) en un módulo de invernadero de 32 m² orientado E-W. El sistema demostró la viabilidad de este tipo de sistemas para explotaciones desconectadas de la red en regiones con una elevada radiación solar. (Rocamora y Tripanagnostopoulos, 2006), diseñaron un sistema híbrido fotovoltaico /térmico con agua y extracción de aire caliente para cubrir las demandas energéticas de la ventilación de un invernadero en Alicante.

(Xu et al, 2014) realizaron un ensayo de calefacción con sistema de colectores solares conectados a un sistema de almacenamiento de energía subterráneo, en Shanghai, China. El colector solar de 500 m², contribuyó a la calefacción del invernadero de superficie 2.304 m², con una carga total de 208,9 GJ. La contribución media de la calefacción pasiva con este sistema fue de 50 W/m².

(Russo et al, 2014) analizaron el uso combinado de fotovoltaica con pozos geotérmicos como sistema de calefacción para invernadero comparando los resultados con un generador de aire caliente de gasolina. Los resultados, evaluados en Valenzano (Italia), demostraron la viabilidad técnica del sistema (producción energética media del sistema de 87,1 MJ/Día y consumo medio de 22,5 MJ/Día) y los beneficios medioambientales gracias a un análisis mediante la metodología de ACV (Análisis de Ciclo de Vida).

(Hassanien et al, 2016) revisaron las aplicaciones de las tecnologías solares (Fotovoltaica, colectores solares,..) en los sistemas de control ambiental en invernaderos como cooling, calefacción e iluminación artificial, así como el bombeo de agua para riego. En relación al uso de invernaderos fotovoltaicos puso de relevancia las diferentes problemáticas que se afrontan, como la agresividad del ambiente del invernadero (temperatura, humedad y tratamientos fitosanitarios), para la instalación de

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

los paneles, la variabilidad de las condiciones microclimáticas en el invernadero, así como la competencia por la radiación debido a los sombreos. Recomienda así mismo adaptaciones de diseño de la estructura, orientación y tipología de los cultivos para mejorar los rendimientos.

Asimismo, (Cuze et al, 2016), en su revisión sobre estrategias renovables y sostenibles para el ahorro de energía en los sistemas de invernadero, consideraron el uso de módulos fotovoltaicos, colectores solares, sistemas híbridos, materiales de cambio de fase, sistemas subterráneos de almacenamiento energético, materiales alternativos de fachada, etc. Los resultados sugieren que adaptaciones en los invernaderos con las tecnologías y materiales disponibles permitirían lograr hasta un 80% de ahorro energético, con un periodo de recuperación de la inversión de 4 a 8 años, dependiendo del clima y el tipo de cultivo.

(Mekhilef, 2013) revisaron la aplicación de energía solar en el sector agrícola con diferentes sistemas como los sistemas de bombeo, calefacción, refrigeración, secado o invernaderos solares. Los sistemas fotovoltaicos /térmicos se muestran como los mejores para la aplicación en agricultura, sobre todo en sistemas aislados y gracias al bajo impacto medioambiental. Sin embargo, el alto coste y la mejora de la eficiencia de los sistemas solares son las principales barreras y áreas de mejora.

(Yano et al, 2009) estudiaron la energía eléctrica generada por módulos fotovoltaicos en cubierta de un invernadero tipo gótico, con orientación N-S en Japón, estudiando las diferencias observadas en producción debido a la colocación (interior o exterior a cubierta) de las placas así como su orientación y ángulo (20° y 28°). Los módulos fotovoltaicos colocados fueron de silicio amorfo y fue estudiada su generación de energía en los meses de Octubre de 2005 a Marzo de 2006. La producción total durante los meses estudiados de los módulos internos (PV_1 a PV_4), fue de 71,6MJ, teniendo una mayor producción aquellos con menor ángulo y orientación este. El estudio comprobó así mismo la mayor producción del módulo colocado en el exterior de la cubierta, PV_5 , así como su mayor vulnerabilidad ante condiciones climáticas extremas (Figura 23).

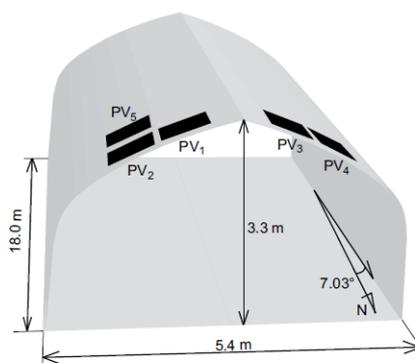


Figura 23. Diagrama esquemático del invernadero N-S con la colocación de paneles fotovoltaicos. PV_1 - PV_4 fueron instalados dentro del invernadero y PV_5 por fuera de la cubierta. Fuente: (Yano et al, 2009)

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

(Yano et al, 2010), estudiaron la distribución espacial de la energía solar en un invernadero fotovoltaico orientado E-W con un 12,9% de sombreado y la energía eléctrica generada (Figura 24). La distribución espacial de la energía solar en el invernadero tuvo una gran variación entre la colocación lineal uniforme y la disposición en tablero de ajedrez. Los resultados demostraron cómo la disposición en tablero de ajedrez mejora el desequilibrio espacial de la energía solar con una ligera disminución de la energía eléctrica generada por las placas (5,31 GJ/m² frente a 5,03 GJ/ m²).

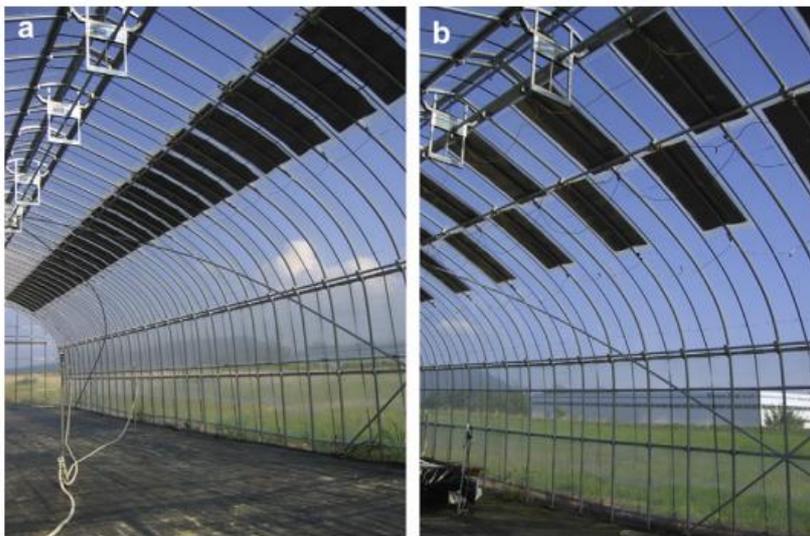


Figura 24. Ensayo de distribución de placas fotovoltaicas sobre cubierta de invernadero.
Fuente:(Yano et al, 2010)

(Pérez-Alonso, 2012) evaluaron la producción energética anual en un invernadero fotovoltaico piloto de 1.024 m² en Almería, con un 9,79% de sombreado producido por placas flexibles fotovoltaicas. La producción alcanzó valores de 8,25 kWh /m². Asimismo, se confirmó la viabilidad del uso de las redes neuronales artificiales para modelar la producción de sistemas fotovoltaicos conectados en cuadrícula.

Otros estudios complementarios como los desarrollados por (Chaurey y Kandpal, 2010), (Qoaidar y Steinbrecht, 2010) o (Varun y Prakash, 2009), ponen de manifiesto de manera generalizada el uso de sistemas fotovoltaicos para la electrificación descentralizada del medio rural y el análisis económico de estos sistemas. Estos estudios **ponen de manifiesto cómo la disminución del uso de combustibles fósiles por el uso de energías renovables puede disminuir la producción de gases contaminantes en la agricultura intensiva**. El desarrollo de estrategias de ahorro energético en el invernadero es de especial relevancia en el contexto en el que nos encontramos, siendo necesario llevar a cabo balances energéticos globales que contemplen la integración de las diferentes soluciones. En el avance de la próxima edición de la revista Applied Energy (fecha de publicación prevista 15 de enero 2021), (Ouazzani et al, 2021), se lleva a cabo un balance energético dinámico de un invernadero considerando todos los elementos interactivos en su interior, incluyendo suelo, plantas o masas internas. Este estudio ha valorado asimismo los efectos positivos del uso de energía renovables (módulos fotovoltaicos y sistema de bomba de calor subterránea) sobre los requerimientos de refrigeración y calefacción, salvando la bomba de calor un 21% de la energía comparando con sistemas tradicionales y proporcionando el sistema fotovoltaico un 44% de las necesidades energéticas anuales.

2. Estudio de los sombreos producidos y la compatibilidad entre la producción agrícola y energética:

El mayor inconveniente de la instalación de módulos fotovoltaicos en el techo del invernadero es la sombra que producen. En países de baja latitud, como España, Italia, Grecia y otros países mediterráneos, la radiación solar satisface suficientemente las necesidades de las plantas que se cultivan en invernaderos. En estos países, la radiación solar en periodos estivales es excesiva y tiene un efecto negativo en el cultivo en invernadero, tanto en irradiación como en temperatura, y su reducción es necesaria (Rocamora y Tripanagnostopoulos, 2006); (Marucci et al, 2012); (Marucci et al, 2013).. En cambio, en periodos invernales, esta radiación no es excesiva, siendo en muchos casos un factor limitante en los cultivos.

El problema de la compatibilidad entre los sistemas fotovoltaicos y agrícolas ha sido recientemente abordado por autores como (Moretti y Marucci, 2019), estudiando la viabilidad de cambiar el grado de sombreado dentro del invernadero basándose en la radiación solar disponible y las necesidades de las plantas, gracias a un sistema dinámico de paneles fotovoltaicos en cubierta. Asimismo, (Li et al, 2020), han evaluado la viabilidad de un sistema de cubierta fotovoltaica semitransparentes ciego (100% de cobertura de paneles), que gracias a un regulador puede rotar los paneles fotovoltaicos instalados en la cubierta, colocándolos en posición perpendicular y dejando pasar la radiación para los cultivos. El sistema está diseñado para poder mantener una radiación solar para los cultivos estable a lo largo de diferentes situaciones climáticas. Tras la evaluación del sistema en las condiciones de Tottori (Japón) para orientaciones N-S y E-W, el sistema demostró que puede suministrar la demanda energética del invernadero y dejar pasar una radiación para los cultivos en torno a los 8-10 MJ*m⁻²*día⁻¹.

En el **Sureste de España** la instalación de paneles solares en los techos de invernaderos es una propuesta interesante para los agricultores debido al gran número de horas de sol anuales de la zona:

(Ureña-Sánchez et al, 2012) evaluaron la producción de tomate en invernadero en Almería, con la generación simultánea de electricidad a través de paneles solares fotovoltaicos flexibles montados en la cubierta de un invernadero Raspa y Amagado. El ensayo, realizado en un invernadero de 1.024 m² sobre tomate variedad *Daniela*, mostró como **porcentajes de sombreado del 9,8% no afectaron en términos estadísticamente significativos la producción o el precio de la venta de tomates. No obstante, en los tratamientos sombreados se observaron frutos con menor intensidad** del color y menor diámetro y calibre.

En una publicación posterior sobre el mismo ensayo, (Aroca-Delgado et al, 2019), los autores analizaron en profundidad los efectos del tratamiento de sombreado (9,8%) sobre la morfología, rendimiento y calidad de los frutos de tomate. En el interior del invernadero, en la zona control hubo una mayor absorción de radiación PAR que en las zonas de sombreado. Esto no produjo efectos sobre la producción total, la comercial, la morfología de la planta, número de flores, color, firmeza y pH del fruto. Si bien el sombreado redujo el tamaño del fruto, no afectó al rendimiento global porque en los tratamientos sombreados hubo más frutos aunque de menor tamaño. Asimismo, se observó un ligero incremento en los sólidos solubles del fruto en los tratamientos sombreados.

El inconveniente es que los paneles fotovoltaicos convencionales son opacos o semitransparentes para maximizar la producción de energía procedente del sol, con la consecuente pérdida de radiación solar que llega a las plantas (Pérez-Alonso et al, 2012) y (Yano y Cossu, 2019). La falta de radiación en el interior de los invernaderos producida por el uso de paneles fotovoltaicos debe ser estudiado en profundidad ya que puede afectar al desarrollo de los cultivos, especialmente en periodos donde la radiación solar es más baja (Cossu et al, 2018), (Roslan et al, 2018) y (Aroca-Delgado et al, 2019). (Cossu et al, 2014) realizaron un estudio de la radiación solar en el interior de un invernadero con placas solares en el 50% de la cubierta, orientadas al Sur, en un invernadero de 960 m² orientado E-W en Sardinia (Italia) (Figura 25).

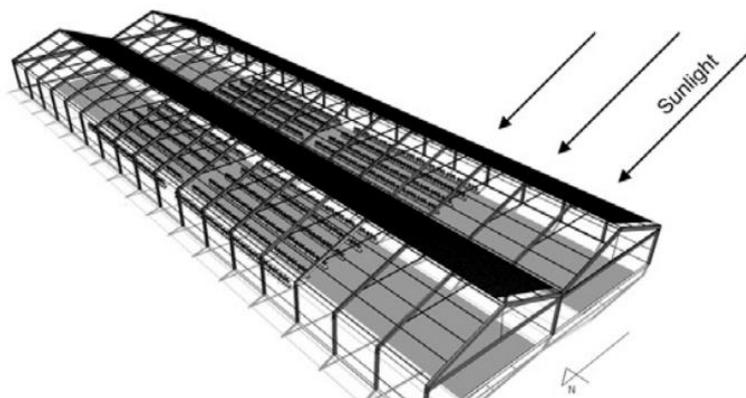


Figura 25. Invernadero fotovoltaico con sombreado del 50%.
Fuente: (Cossu et al, 2014)

El sistema fotovoltaico instalado redujo en un 64% la radiación solar disponible, con una distribución del gradiente N-S, con más energía solar en las paredes laterales del invernadero y menor en el centro, excepto en invierno, cuando la radiación fue similar en todas las líneas del invernadero. La reducción de radiación fue del 46% anual bajo la zona de cubierta plástica y del 82% en la zona cubierta con paneles solares. Agronómicamente, se realizaron medidas sobre un cultivo de tomate en dos ciclos consecutivos (Agosto a Octubre y Enero a Mayo). La producción total y comercial se vio afectada por el gradiente de radiación N-S, con una producción comercial de 6,4 kg/m² a 4,9 kg/m². No obstante, durante este ensayo el cultivo fue complementado con iluminación artificial.

(Bertin et al, 2017) evaluaron los efectos del sombreado de los paneles fotovoltaicos en el rendimiento de los cultivos de invernadero. Concretamente, la evaluación se realizó con el modelo de crecimiento de tomate TOMGRO, en dos tipos de invernaderos fotovoltaicos Venlo y asimétrico, con cobertura del 50 % de la cubierta total (colocación E-W en ambos casos) y para varias densidades de cultivo. El uso de paneles fotovoltaicos limita la producción y rendimiento de los cultivos. En el invernadero asimétrico se estimó un 70% de reducción de la cosecha para una densidad de 5 plantas /m² y un 58% de reducción en el Venlo para una densidad de 1,5 plantas/m². Estas reducciones en el rendimiento se estiman fueron causadas por un menor número y peso medio de los frutos.

(Cossu et al, 2018), modelaron la disminución de radiación solar en invernaderos fotovoltaicos para diferentes % de sombreado, tipo de invernadero y disposición en cubierta de las placas (Figura 26). Los resultados ofrecieron que la radiación global acumulada disminuye un 0,8% por cada 1% adicional de cobertura fotovoltaica para invernaderos con orientación E-W y un 0,6% para el caso de invernaderos orientados N-S. Adicionalmente, la altura del invernadero se demostró como influyente, incrementando un 3,8% adicional la radiación disponible por cada metro adicional de altura de canal del invernadero.

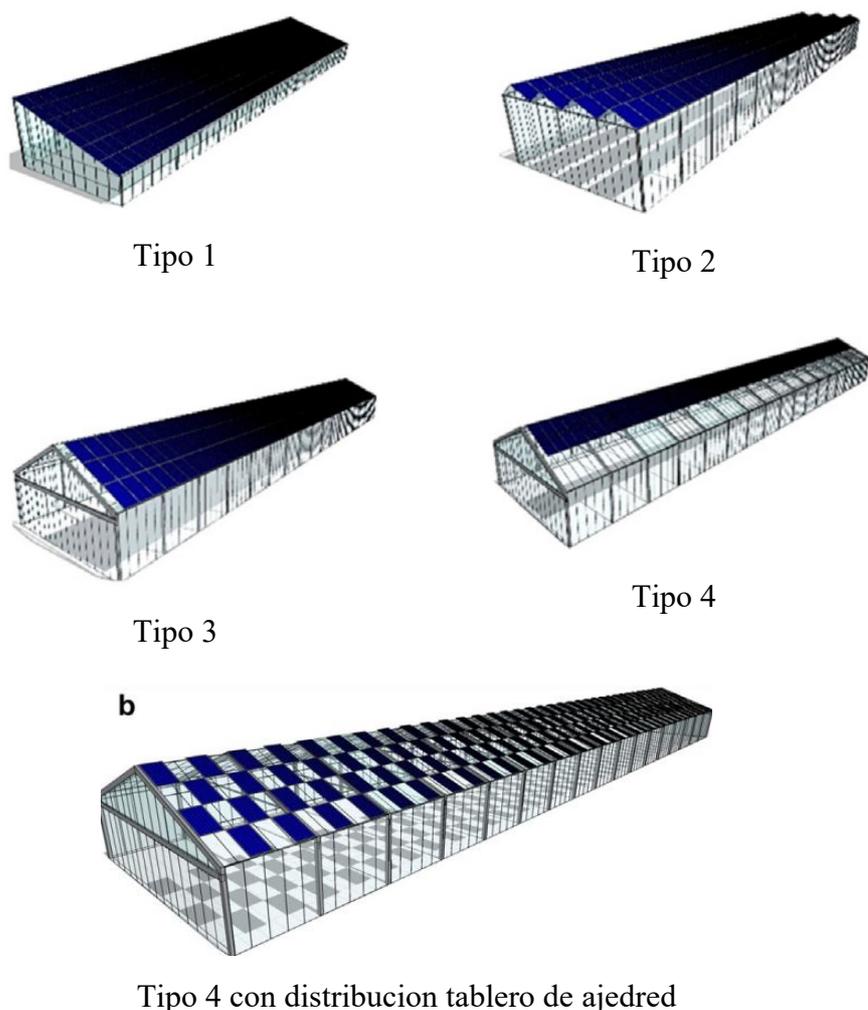


Figura 26. Tipologías de invernadero y sombreos estudiados. Fuente: (Cossu et al, 2018)

El invernadero tipo 1 estudiado (100% de cobertura en cubierta) fue el más perjudicado en términos de radiación disponible para el cultivo, solo un 35% de la radiación comparado con un invernadero convencional (Orientación E-W); en cambio, el invernadero tipo 4 (25% de cobertura en cubierta), mostró unos resultados de 74% de radiación alcanzando el cultivo (Figura 26). En general la orientación N-S permitió incrementar la radiación global acumulada un 24% de media, con respecto a la orientación E-W, aunque la producción energética disminuyó un 15%. Asimismo, la

distribución en forma de tablero de ajedrez estudiada en el tipo 4 con respecto a la distribución tradicional, consiguió incrementar la distribución uniforme de la radiación dentro del invernadero.

(Bulgari et al, 2015) compararon los efectos del sombreado en un invernadero fotovoltaico sobre los parámetros climáticos del invernadero y el crecimiento y calidad de frutos de tomate en Merlino (Italia). Para ello compararon dos cultivos de tomate en hidropónico sobre fibra de coco en dos invernaderos, uno de ellos con un **50% de cobertura con placas solares** de silicio monocristalino montadas sobre la cara sur de un invernadero de cristal orientado E-W. El invernadero testigo fue blanqueado en el periodo de Junio a Septiembre, siguiendo las prácticas tradicionales. Las plantas de tomate fueron transplantadas en Febrero de 2013, con una densidad de 3 plantas/m². La toma de datos fue llevada a cabo de Mayo a Septiembre.

Los resultados del estudio muestran una reducción significativa de la radiación solar respecto al invernadero testigo, con efectos cuantitativos y cualitativos negativos sobre la producción de tomate. Los principales efectos observados fueron:

- La altura del cultivo fue similar en ambos invernaderos, ligeramente superior en el invernadero tradicional (5,8 m de longitud) que en el fotovoltaico (5,25 m)
- El número de flores y frutos en el invernadero sombreado fue menor, obteniendo una menor productividad para todo el periodo, excepto a principios de Julio, donde la cosecha fue de 6 kg/m² en ambos invernaderos (Figura 27). El peso de los frutos en ambos tratamientos no presentó diferencias significativas.

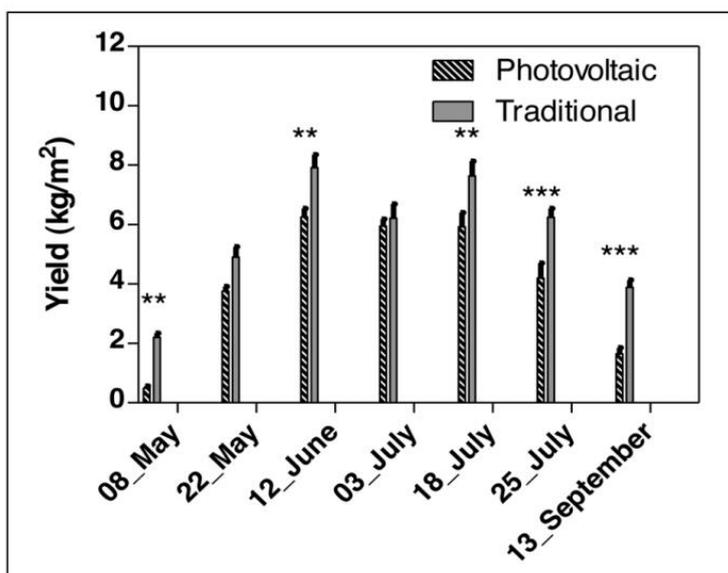


Figura 27. Rendimiento de tomate en ensayo de sombreado 50%.
Fuente: (Bulgari et al, 2015)

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

- Los tomates cultivados sin sombreado fotovoltaicos obtuvieron mayores concentraciones de licopeno (82,8 mg/kg de licopeno frente a 41,7 mg/kg) y el doble de β caroteno (8,4 mg/kg en invernadero tradicional).
- Los niveles de concentración de azúcares fueron mayores en el invernadero sin sombreado fotovoltaico (7,59 mg/kg frente a 5,85 mg/kg).

Durante los períodos de alta radiación solar, el sombreado es el método principal para reducir la carga solar dentro de los invernaderos porque los materiales de sombra reflejan y absorben partes de la radiación solar, y el resto penetra dentro de los invernaderos (Al-Ibrahim et al, 2006). Por tanto, el uso de paneles fotovoltaicos durante estos periodos puede producir sombreado que beneficie a los cultivos y generar ingresos o reducir costes por la producción de energía eléctrica. Por el contrario, durante periodos de baja radiación solar, un sombreado excesivo puede reducir demasiado la radiación en el interior del invernadero y provocar efectos negativos sobre los cultivos (Cockshull et al, 1992), (Challa y Bakker, 1998), (Lorenzo et al, 2006), (Callejón-Ferre et al, 2009) y (Cossu et al, 2014).

(Ezzaeri et al, 2018), realizaron un ensayo sobre efectos en el clima y producción de tomate en un invernadero tipo canario, con un 10% de sombreado en cubierta. El ensayo, realizado en dos invernaderos de 172 m² en Agadir (Marruecos), fue realizado con placas fotovoltaicas flexibles colocadas en el 10% de la cubierta, orientada E-W. El nivel de sombreado estudiado, no produjo efectos significativos en la producción de tomate, incluso, el tratamiento con sombreado fotovoltaico tuvo una producción ligeramente superior. Esto puede ser debido, a que los investigadores observaron una menor incidencia de la plaga *Tuta Absoluta* en este tratamiento.

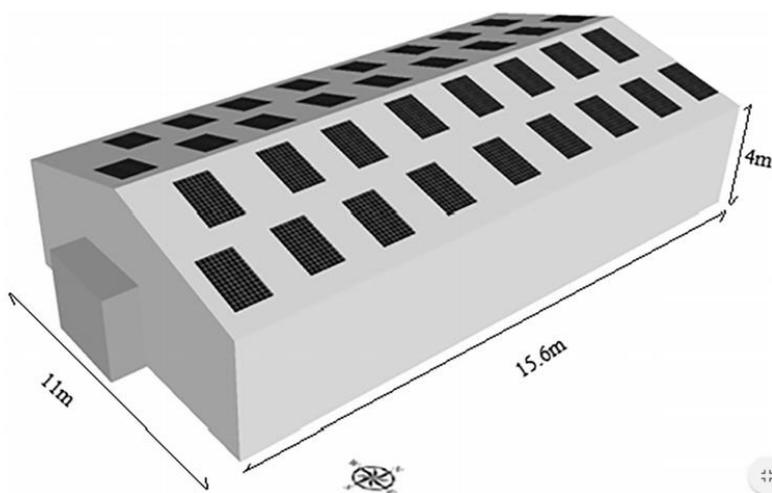


Figura 28. Disposición de placas en cubierta (10% de cobertura).

Fuente: (Ezzaeri et al, 2018)

Estudios posteriores de (Ezzaeri et al, 2020), afirman que un 40% de sombreado fotovoltaico con placas flexibles sobre un invernadero tipo canario, no produjo efectos significativos sobre la producción de tomate, aunque sí produjo un efecto negativo sobre la madurez del fruto. Estas placas fotovoltaicas fueron colocadas en disposición de tablero de ajedrez.

(Marucci et al, 2018), evaluaron el efecto de los sombreados producidos por placas fotovoltaicas, en este caso, sobre cubierta de un invernadero tipo túnel. Este tipo de invernaderos han sido menos estudiados por la mayor complejidad de la instalación

frente a los invernaderos de cubierta plana. En el estudio llevado a cabo en la localidad de Viterno (región central de Italia), se realizó una disposición en tablero de damas de módulos fotovoltaicos semitransparentes flexibles de silicio monocristalino, con una eficiencia del 18% (Figura 29).



Figura 29. Detalle de la disposición de las células fotovoltaicas en invernadero de túnel.
Fuente: (Marucci et al, 2018)

Con la disposición detallada, la forma curvilínea de la estructura, propició que la sombra se proyectara de manera prácticamente continua en el interior del invernadero entre los meses de Marzo y Septiembre, y parcialmente fuera en el resto de meses. El porcentaje de sombreo nunca excedió el 40% durante el periodo estudiado.

Los módulos fotovoltaicos instalados en el interior del invernadero de forma permanente durante todo el periodo de cultivo (y varias campañas consecutivas), puede producir sombreo excesivo durante periodos de baja radiación solar. Pese a que el sombreo en invernaderos ha sido ampliamente estudiado (Aroca-Delgado et al, 2018), **es de gran interés conocer el nivel de sombreo máximo que pueden producir los módulos fotovoltaicos opacos en invernaderos mediterráneos tal que el cultivo no se vea afectado.**

En los invernaderos del sur de Europa, la orientación de la estructura suele ser este-oeste, siendo esta la orientación de la estructura en la mayoría de las investigaciones realizadas sobre la producción de energía fotovoltaica (Ureña-Sánchez et al, 2012); (Pérez-Alonso et al, 2012); (Yano et al, 2010); (Aroca-Delgado et al, 2019). (Yano et al, 2009) estudiaron la energía eléctrica generada por módulos fotovoltaicos montados dentro del techo de un invernadero orientado norte-sur en Japón. En cambio, en dicho estudio no se evaluó el efecto que produjo el sombreo de los módulos fotovoltaicos sobre el cultivo. Por tanto, **puede ser de gran interés el estudio de láminas fotovoltaicas en estructuras con orientación norte-sur del eje principal del invernadero.**

Recientemente han aparecido estudios sobre el efecto que producen sobre los cultivos la sombra originada por módulos fotovoltaicos ubicados en el techo del invernadero (Ureña-Sánchez et al, 2012); (Bertin et al, 2017); (Ezzaeri et al, 2018), (Aroca-Delgado et al, 2019). En cambio, ninguno de estos estudios ha evaluado conjuntamente el efecto de diferentes niveles de sombra que producirían estos módulos sobre los cultivos. Además, estas investigaciones se han realizado sobre invernaderos cuyo eje principal

tenían orientación este-oeste. Por este motivo, **esta tesis tiene como objetivo describir el estudio del efecto de diferentes niveles de sombreado que producen láminas opacas que simulan módulos fotovoltaicos ubicadas en el exterior del techo de invernadero con orientación norte-sur, sobre un cultivo de tomate.**

3. Estudios socio-económicos

En España, como se expresa en el apartado 2.5., la política y regulación sobre fotovoltaica asociada a la producción en invernaderos es compleja. (Carreño- Ortega et al, 2017), analizaron las implicaciones regulatorias y medioambientales de estos sistemas en el Sureste de España, tomando como ejemplo la provincia de Almería. En la última década, la regulación española ha sufrido varios cambios, pasándose de ser uno de los países con políticas activas de generación de energías renovables (Figura 30) a una situación de recesión en las inversiones por el cambio de las mismas (Figura 31) con recortes presupuestarios a las subvenciones a partir de 2010. Posteriormente, el Real Decreto-Ley 900/2015, coloquialmente denominado “Impuesto al Sol” regulaba los sistemas eléctricos de autoconsumo y la producción de energías renovables. Este reglamento, ya derogado, establecía una serie de costos adicionales tanto para los sistemas de autoconsumo como para la producción excedente.

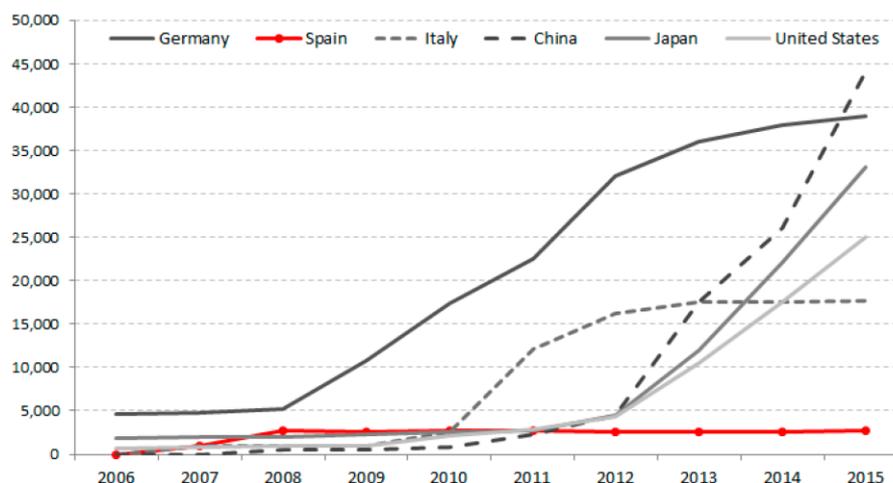


Figura 30. Potencia fotovoltaica instalada en el mundo (MW).

Fuente: (Carreño- Ortega et al, 2017)

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

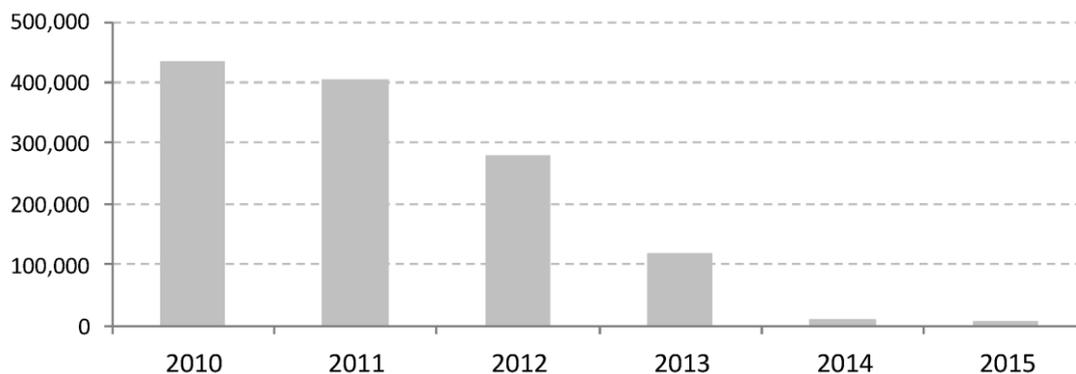


Figura 31. Nueva potencia fotovoltaica instalada en España (kW).
Fuente: (Carreño- Ortega et al, 2017)

El estudio realizó una serie de escenarios económicos de rentabilidad de invernaderos fotovoltaicos en régimen de autoconsumo, y con apoyo del 50% de la inversión inicial en subvención. Las simulaciones muestran una mayor rentabilidad de las fincas, que puede oscilar entre 0,88% para el peor escenario al 52,78% para el mejor de los casos.

(Wang et al, 2017), estima el periodo de amortización de los invernaderos fotovoltaicos con tecnología moderna en China, alrededor de los 9 años. Avances en tecnología solar como la mejora del almacenamiento térmico, la potencia fotovoltaica generada, y el balance en la utilización de la luz han promovido la utilización de energía solar en invernaderos modernos. El incremento de los últimos años en China de la superficie de invernaderos (Figura 32), muestra como se ha experimentado una evolución desde los invernaderos tradicionales chinos o cobertizos, a túneles de plástico o estructuras modernas industriales como el invernadero multicapilla o el invernadero solar.

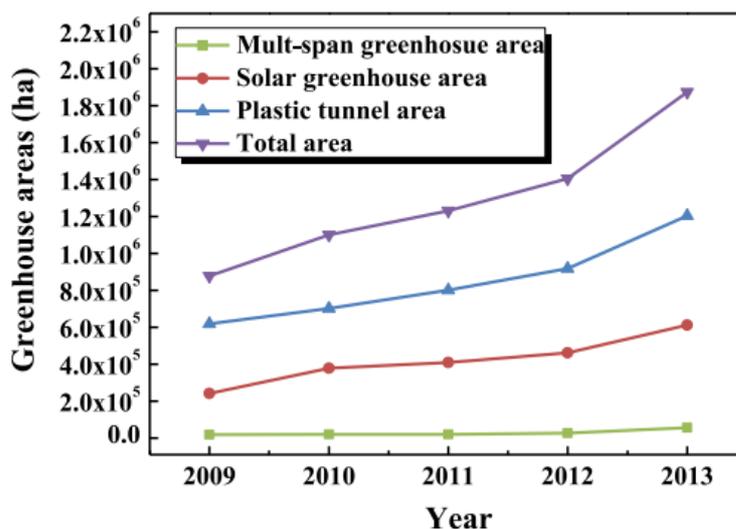


Figura 32. Superficie de invernaderos en China de 2009 a 2013.
Fuente: (Wang et al, 2017)

Los casos de invernaderos fotovoltaicos comerciales recopilados muestran grandes áreas e inversiones. En general, las instalaciones de invernaderos fotovoltaicos alcanzan las decenas de megawattios producidos, alcanzando el mayor de ellos, incluso la capacidad de 50 MW/año con una superficie de 167 ha de invernadero y una inversión de 74,8 millones de dólares. El análisis económico de una explotación de 132 ha de invernadero fotovoltaico en la provincia Xinjiang, con placas fotovoltaicas (50 MW de potencia total) en cubierta instaladas en un ángulo de 35° arroja una estimación de 8,7 años de plazo para la recuperación de la inversión.

(Li et al, 2017), asimismo, ha analizado recientemente la situación socio-económica de los invernaderos fotovoltaicos en China, y su rápida expansión en los últimos años. Los resultados muestran buenas perspectivas, con unos porcentajes anuales de recuperación de la inversión que varían del 9 al 20% con un periodo de amortización de 4 a 8 años, dependiendo sobre todo del tipo de cultivo producido. Además, los invernaderos fotovoltaicos generan una serie de beneficios sociales, como la creación de nuevos puestos de trabajo, aumento de impuestos y disminución de las emisiones de CO₂. Asimismo, este autor pone de relevancia que la mayoría de las inversiones de invernaderos fotovoltaicos en el país asiático, son promovidas por empresarios del sector fotovoltaico, sin experiencia en la producción de cultivos, por lo que las instalaciones suelen ser orientadas a la producción de MW en vez de a la producción agrícola, para poder obtener subvenciones gubernamentales. Esto conlleva, en la mayoría de los casos, una infrautilización de los invernaderos. Sin embargo, el factor cultivo, es clave para incrementar la rentabilidad de estas instalaciones.

De manera análoga, autores como (SgROI et al, 2014) han puesto de relevancia la situación de la regulación italiana, con el conocido sistema “Conto Energía”, un sistema de incentivos específico para la generación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red puesto en marcha en varios esquemas desde 2005 a 2013. En la actualidad, según las últimas noticias de medios italianos se espera una nueva política de incentivos a la fotovoltaica para septiembre de 2021. En su estudio, analizaron el impacto económico del Segundo periodo “Conto Energía” de una explotación de 1,5 ha, con una superficie de invernadero de 0,5 ha destinada al cultivo de espárrago, cubierta al 100 % con paneles fotovoltaicos. El resto de la explotación está destinada a una rotación de tomate y coliflor. La inversión total, de 1,17 M€ y una producción energética de 1500 kWh/año, ofrece unos beneficios de 112.709 € en un periodo de 20 años. Sin embargo, esta política y sistema de incentivos, vuelve a posicionar el cultivo agrícola como marginal en los ingresos económicos de la explotación, poco importando la productividad o los efectos sobre el cultivo.

(Vourdoubas, 2015), realizó un análisis económico y medioambiental del uso de energías renovables con un caso de estudio en Creta, Grecia. El análisis del uso de biomasa y energía geotérmica directa (fuentes cercanas) para calefacción y refrigeración de invernaderos se mostró como una inversión atractiva con beneficios económicos. Sin embargo, el uso de bombas de calor y prospecciones geotérmicas y los invernaderos fotovoltaicos no se mostraron como inversiones rentables para el caso de Creta. Particularmente esto es debido a que el coste de energía eléctrica para el sector agrícola en Grecia es subvencionado por el gobierno, lo cual desalienta las inversiones en este país.

El estudio del uso de invernaderos fotovoltaicos ha suscitado gran interés entre los investigadores, en especial en países como Italia, España y Japón (Aroca-Delgado et al, 2018). **Las aplicaciones energéticas**, con objeto de cubrir parcial o totalmente la demanda energética del invernadero, son de gran interés, en especial en sistemas aislados, contribuyendo asimismo a la disminución del impacto ambiental gracias a la disminución del uso de combustibles fósiles. En el caso de la provincia de Almería, debido a la baja demanda energética de la mayoría de los invernaderos y la elevada cantidad de horas de sol, parece una solución prometedora para disminuir el impacto ambiental de los invernaderos y generar energía eléctrica para el autoconsumo y el vertido a red en su caso.

Las investigaciones precedentes, han estudiado diferentes % de sombreado (10,25,40,50 y 100%) en diferentes latitudes y disposición de las placas de cubierta. **Los resultados precedentes sugieren que % de sombreado inferiores al 10%** no afectan significativamente a la producción y rendimiento de los cultivos. Los estudios previos se han llevado a cabo fundamentalmente **en invernaderos con orientación Este- Oeste**, sin embargo, esta orientación no es habitual en la provincia de Almería, debido al régimen de vientos predominante.

En la presente tesis, se plantea como **objetivo evaluar los efectos sobre el cultivo del tomate en un invernadero de Almería con orientación N-S, de diferentes % de sombreado, explorando % de sombreado superiores al 10%** que, en las condiciones de la provincia de Almería, ha demostrado no provocar efectos negativos sobre la producción de tomate, aunque sí sobre la calidad comercial (Ureña-Sánchez et al, 2012) y (Aroca-Delgado et al, 2019). Asimismo, se evalúa la rentabilidad de las instalaciones propuestas como una **herramienta para la toma de decisiones de inversión para el agricultor tipo en Almería**.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

2.7. Experiencias comerciales de invernaderos fotovoltaicos en la provincia de Almería.

Como ha quedado patente en la revisión bibliográfica, el uso de invernaderos fotovoltaicos ha suscitado un gran interés entre la comunidad investigadora. Asimismo, diversas iniciativas privadas han surgido, para el diseño de invernaderos fotovoltaicos y la integración o adaptación de paneles a las estructuras de cubierta.

En este sentido, se revisan a continuación algunas de las experiencias llevadas a cabo mediante iniciativa privada:

Proyecto europeo SUN4GREEN de las empresas RUFEPA TECNOAGRO y SUNBOOST LTD. En este proyecto europeo (Abril 2017- septiembre 2019), se ha trabajado en el diseño de una estructura de invernadero de tipología multitúnel –ojival, con un sistema de ensamblaje de paneles fotovoltaicos patentado, con colectores ópticos situados en la zona de canal, que permite el control estacional de la energía solar para el desarrollo de cultivos y la generación de energía fotovoltaica al evitar el exceso de luz en verano llega a los cultivos y lo convierte en electricidad, mientras que en invierno la luz puede llegar a los cultivos sin ningún problema.

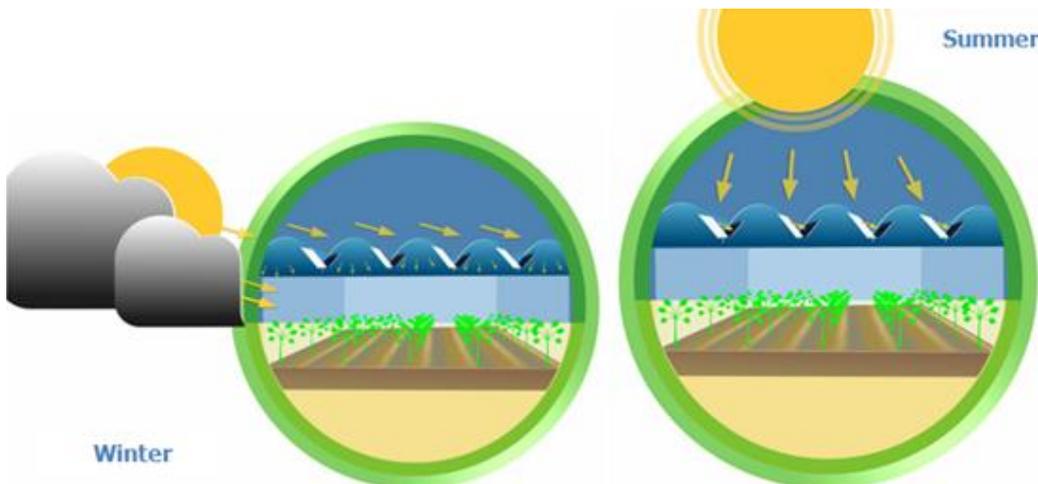


Figura 33. Fotografías del prototipo e infografías de SUN4GREEN

Los ensayos para determinar la compatibilidad de la producción eléctrica y de cultivos (tomate y melón) se están llevando a cabo en Almería, en la finca experimental del CT TECNOVA.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Proyecto “Nuevo diseño de invernaderos con integración de células fotovoltaicas” financiado por CDTI (IDI-20110485), desarrollado por la empresa Juan Galindo SL.

En este proyecto privado, la empresa Juan Galindo SL llevó a cabo la integración en un invernadero Raspa y Amagado con orientación E-O, en la localidad de Roquetas de Mar (Almería) de un sistema fotovoltaico de 13,68 kWp en cubierta (Figura 34 y Figura 35).



***Figura 34. Vista aérea de invernadero comercial con cubierta fotovoltaica.
Fuente: Megal Energía***



***Figura 35. Vista interna de invernadero comercial con cubierta fotovoltaica.
Fuente: Megal Energía***

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Con la instalación proyectada se tenía una producción eléctrica anual total de 23.341 kWh/año, con aproximadamente un 10% de sombreado en la zona afectada. La instalación, realizada en una explotación comercial, se integró sin problemas para el agricultor ni disminuciones en la producción comercial registrada.

La cooperativa Agrupaejido, llevó a cabo una inversión y acuerdos comerciales con empresas de tecnologías fotovoltaicas como Assyce Group, llevando a cabo la instalación de invernaderos fotovoltaicos eco-sostenibles tanto en la provincia de Almería como en Cerdeña, sin embargo, esta iniciativa no ha parecido consolidarse entre los agricultores de la provincia.

Las **experiencias comerciales** de aplicación de fotovoltaica en invernaderos en la provincia de Almería son aún **escasas y enmarcadas dentro de proyectos de I+D+i** financiados con fondos públicos. No obstante, **se vislumbra un interés privado por el desarrollo de este tipo de iniciativas** una vez se consoliden los resultados de las investigaciones en referencia a los % de sombreado máximos admitidos por los cultivos y haya un mayor avance en la eficiencia de las placas fotovoltaicas y la adaptación de su instalación en cubierta, bien sea con sistemas fijos o dinámicos.

2.8. Patentes relacionadas

Se contempla en este apartado la actividad registrada en la **Oficina Española de Patentes y Marcas**, como vía para tomar el pulso a la iniciativa en este sentido. Para ello, se ha consultado la base de datos INVENES, bajo la consigna de búsqueda “Invernadero fotovoltaico”. De los 98 resultados arrojados por la base de datos, tan solo 11 tienen relación o aplicaciones directas sobre invernaderos. Una de ellas, es la patente solicitada por FUNDACION TECNOVA, en relación al invernadero SOLNOVA, sobre el que se han desarrollado las investigaciones de la presente tesis. Esta patente se adjunta para su consulta en el ANEXO III. PATENTE SOLNOVA. Se presenta el resumen del resto de patentes relevantes a los invernaderos fotovoltaicos, ordenadas por año de solicitud:

Elemento de cubierta para invernadero o similares. Roccaforte, Giacomo (IT). 2008 (ES2301132).

Elemento de cubierta para invernaderos o similares, que incluye un primer elemento (3) a modo de panel transparente rígido que tiene un tamaño predeterminado, en el que dicho primer elemento tiene áreas (7) con un coeficiente de transmisión de luz alto, en particular áreas sustancialmente transparentes, alternadas con áreas (6) con un coeficiente de transmisión de luz bajo, en particular sustancialmente cero, es decir áreas opacas, caracterizado porque se proporcionan medios ópticos para desviar y concentrar la luz (11) sobre las áreas opacas cuando el sol (12) está en su posición más alta por encima del horizonte, y para desviar y concentrar progresivamente la luz (11) sobre las áreas transparentes cuando el sol (12) está en su posición más baja por encima del horizonte, de tal manera que se controla automáticamente la radiación (11) solar en el invernadero y se impide cualquier cambio de temperatura excesivo en el mismo.

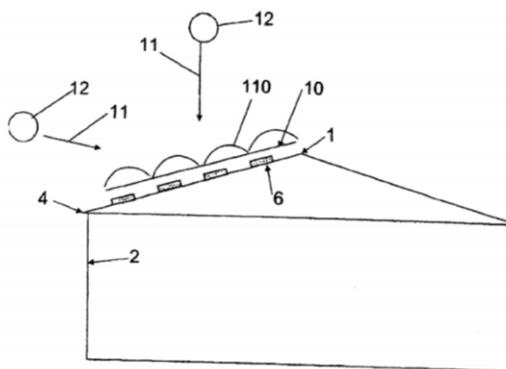


Figura 36. Ilustración de la patente ES2301132

Según la descripción, en las áreas opacas (6) se pueden colocar los paneles fotovoltaicos.

INVERNADERO FOTOVOLTAICO. NOVEDADES AGRICOLAS, S.A. (ES). 2012. [ES2390553](#).

Invernadero fotovoltaico.

Son conocidos invernaderos que configuran túneles (1) paralelos, a base de pilares (2) y dinteles (3) convenientemente arriostrados, sobre los que se establecen correas longitudinales (4) para soportar la cubierta propiamente dicha, a base de film de polietileno o de placas de policarbonato. Algunos de estos invernaderos incorporan placas fotovoltaicas para generar la energía necesaria en el normal uso del invernadero. Estas placas se acumulan sobre soportes propios e independientes, generando un oscurecimiento en el interior del invernadero bajo las mismas, que resulta negativo para el desarrollo de las plantas. La invención consiste en disponer las placas fotovoltaicas (6) formando alineaciones longitudinales sobre las propias correas (4), quedando dichas placas acusadamente distanciadas entre sí, de manera que el efecto sombra que generan sobre una determinada planta es intermitente, con periodos de radiación solar directa considerablemente más largos que los periodos de oscurecimiento, con lo que la instalación fotovoltaica no afecta de forma considerable a dicha planta.

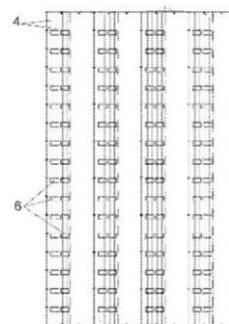


FIG. 1

Figura 37. Ilustración de la patente ES2390553

Aplicación de concentradores solares luminiscentes para la obtención de energía eléctrica durante el crecimiento de organismos fotosintéticos. LANGE BER GAVILAN, Carlos (ES). 2014. [ES1133481](#)

1. Aplicación de concentradores solares luminiscentes para la obtención de energía eléctrica durante el crecimiento de organismos fotosintéticos caracterizados por ser usados en el cubrimiento de superficies arquitectónicas tales como tejados o fachadas, particularmente en invernaderos, que comprende una capa de material conductor de la luz hacia los bordes gracias a su pigmentación fotoluminiscente que le confiere la característica de guía de ondas.
2. Aplicación de concentradores solares luminiscentes para la obtención de energía eléctrica durante el crecimiento de organismos fotosintéticos según la reivindicación 1, caracterizados por tener una forma que facilite la yuxtaposición permitiendo añadir paneles de forma modular a la hora de cubrir una superficie.
3. Aplicación de concentradores solares luminiscentes para la obtención de energía eléctrica durante el crecimiento de organismos fotosintéticos según las reivindicaciones anteriores, caracterizados por tener forma rectangular para su uso en el cubrimiento de fachadas de edificios y en el cubrimiento de jardines verticales.
4. Aplicación de concentradores solares luminiscentes para la obtención de energía eléctrica durante el crecimiento de organismos fotosintéticos según las reivindicaciones anteriores, caracterizados por tener forma hexagonal para la formación de mallas en invernaderos.
5. Aplicación de concentradores solares luminiscentes para la obtención de energía eléctrica durante el crecimiento de organismos fotosintéticos según las

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

- reivindicaciones anteriores, caracterizados por tener un pigmento fotoluminiscente que posee algún ion de elevado rendimiento cuántico, con gran absorbancia para las longitudes de onda que no usadas por las clorofilas vegetales.
6. Aplicación de concentradores solares luminiscentes para la obtención de energía eléctrica durante el crecimiento de organismos fotosintéticos según las reivindicaciones anteriores, caracterizados por tener una densidad óptica superior a 2 en su máximo de absorción y de absorbancia inferior a 0,3 para los intervalos de longitudes de onda 380-490 nm y 590-700 nm.
 7. Aplicación de concentradores solares luminiscentes para la obtención de energía eléctrica durante el crecimiento de organismos fotosintéticos según las reivindicaciones anteriores, caracterizados por tener un espectro de emisión comprendido entre los 510 y 650 nm.
 8. Aplicación de concentradores solares luminiscentes para la obtención de energía eléctrica durante el crecimiento de organismos fotosintéticos según las reivindicaciones anteriores, caracterizados por tener células fotovoltaicas que se ajustan, mediante medios convencionales, a la longitud de onda de emisión del panel.

Invernadero fotovoltaico con eficiencia mejorada. Gramma Green Asset Management S.R.L(IT). 2014. [ES2448290](#).

“Un invernadero fotovoltaico (1) que comprende una estructura (2) para soportar un tejado (3) de al menos una inclinación en la que dicho tejado (3) tiene al menos una

porción (3a) suya que está totalmente libre de paneles fotovoltaicos con el fin de permitir que los rayos solares incidentes radien la superficie inferior (3b) del invernadero, y en el que la porción restante (3c) de dicho tejado (3) está provista de paneles fotovoltaicos (10), caracterizado por el hecho de que los paneles fotovoltaicos tienen una capacidad de absorción de rayos solares incidentes que aumenta desde un valor mínimo en el límite con dicha porción (3a) del tejado que está libre de paneles fotovoltaicos (10) hasta un valor máximo en la cresta (6) de dicho tejado (3)”.

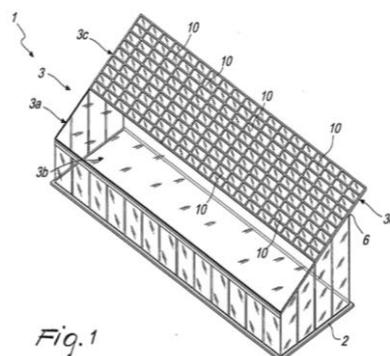
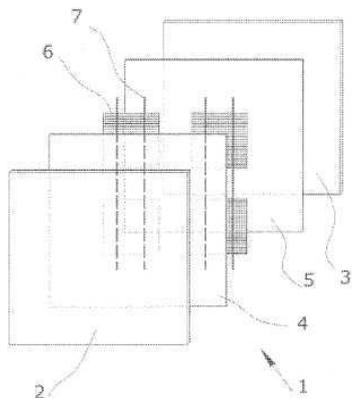


Figura 38. Ilustración de la patente ES2448290

Módulos fotovoltaicos en vidrio estructural y de seguridad para techumbres de invernaderos agrícolas. Costruire Insieme S.r.l. (IT). 2014. [ES2498734](#)



Panel fotovoltaico (1) de vidrio de seguridad estructural para cubrir invernaderos destinados a cultivos agrícolas, del tipo que comprende una pluralidad de células fotovoltaicas (6) insertadas entre dos láminas de vidrio (2, 3) acopladas una a otra por dos láminas de material polimérico transparente (4, 5), estando posicionadas dichas células fotovoltaicas (6) entre dichas dos láminas de material polimérico transparente (4, 5), caracterizado por que dicho material polimérico transparente está libre de sustancias estabilizadoras para rayos ultravioleta.

Figura 39. Ilustración de la patente ES2498734

DISPOSITIVO DE CONCENTRACIÓN SOLAR, PANEL FOTOVOLTAICO E INVERNADERO QUE LO INCLUYEN ABENGOA SOLAR NEW TECHNOLOGIES, S.A. (ES). 2015. [ES2537029](#)

Dispositivo de concentración solar, panel fotovoltaico e invernadero que lo incluyen. Dispositivo de concentración solar caracterizado porque comprende un sustrato (4) transparente o semitransparente, un recubrimiento de cristal fotónico (2), al menos una célula fotovoltaica (1A, ...1D) dispuesta sobre el sustrato (4), con la superficie activa de la al menos una célula fotovoltaica dispuesta paralela al sustrato (4), y una capa de material luminiscente (3) dispuesta en contacto con el recubrimiento de cristal fotónico (2), en donde o bien el recubrimiento de cristal fotónico (2) está dispuesto sobre el sustrato (4) y la capa de material luminiscente (3) está dispuesta sobre el recubrimiento de cristal fotónico (2), o bien la capa de material luminiscente (3) está dispuesta sobre el sustrato (4) y el recubrimiento de cristal fotónico (2) está dispuesto sobre la capa de material luminiscente (3).

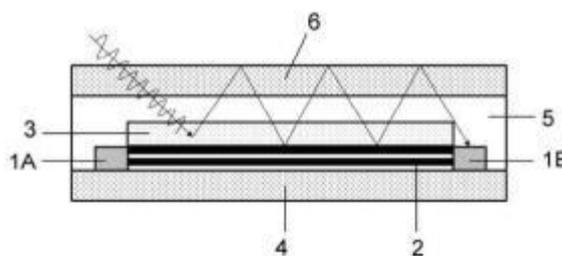


FIG. 2

Figura 40. Ilustración de la patente ES2537029

Invernadero y sistema para generar energía eléctrica y cultivo en invernaderos.
Artigianfer di Virgilio Cardelli S.r.l.(IT). 2016. [ES2575020](#)

Invernadero comprendiendo:

- una sola sección o múltiples secciones una al lado de otra; teniendo la o cada una de las secciones un techo (12, 13), del tipo que tiene un caballete sustancialmente paralelo con respecto a la extensión longitudinal del invernadero y unas pendientes (13) inclinadas de modo opuesto, a través de las cuales la luz solar puede pasar al menos parcialmente para facilitar el cultivo por debajo,
- al menos dos porciones (13A) abatibles de dicho techo para permitir la ventilación del invernadero, dispuestas a proximidad del caballete (14) del techo, dispuestas de modo opuesto y a lo largo de la misma posición longitudinal con respecto al caballete (14) del techo, siendo dichas al menos dos porciones abatibles (13A) del techo adaptadas para girar alrededor de un eje (X) sustancialmente paralelo a la extensión del caballete del techo del invernadero con respecto a un lado de la respectiva porción de dicho techo, de tal modo que están pivotando desde una posición cerrada hacia una posición máxima de abertura, caracterizado por
- una porción fija para cada pendiente del techo, dispuesta más abajo y adyacente a una porción pivotante respectiva (13A) a lo largo de la misma posición longitudinal con respecto al caballete (14) del techo, siendo dicha porción fabricada de un material a través del cual puede pasar la luz del sol, y
- al menos dos módulos fotovoltaicos (15), siendo cada uno de los cuales fijado a, o formando parte de, una porción pivotante respectiva del techo (13A), de manera que dichas porciones pivotantes del techo (13A) forman con dichos respectivos módulos fotovoltaicos (15) una parte de las respectivas pendientes inclinadas (13) del techo (12, 13) y se encuentran a proximidad del caballete (14) del techo; cuando la inclinación de dichas porciones pivotantes (13A) cambia, dichos respectivos módulos fotovoltaicos (15) siguen el movimiento de la porción pivotante (13A), en donde, al menos para una parte del movimiento de la misma, dichas dos porciones pivotantes (13A, 13A') que soportan los respectivos módulos fotovoltaicos (15, 15') están sustancialmente paralelas y/o alineadas una con respecto a la otra.

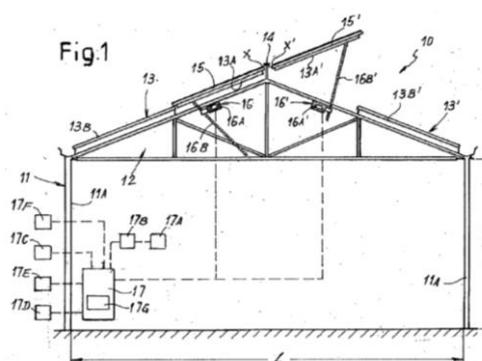


Figura 41. Ilustración de la patente ES2575020

Textil de sombreado elástico con elementos fotovoltaicos y acristalamiento múltiple correspondiente. Penn Textile Solutions GmbH (DE). 2017. [ES2621669](#).

Textil de sombreado que presenta una pluralidad de láminas fotovoltaicas (1) de forma de tiras que están yuxtapuestas por medio de un sistema de hilados (2) a lo largo de su dirección longitudinal (L) o que, distanciadas una de otra, forman un producto continuo, estando construido elástico el sistema de hilados (2) en al menos una dirección (K), de modo que, mediante un tensado del textil elástico, se puede variar una distancia perpendicular a la dirección longitudinal (L) entre láminas fotovoltaicas contiguas (1), caracterizado por que el textil de sombreado presenta entre las láminas fotovoltaicas contiguas, en un estado tensado, unas aberturas que únicamente se forman al tensar el textil de sombreado o que están ocultas por las láminas fotovoltaicas (1) cuando está sin tensar el textil de sombreado.

Concentrar la energía solar con invernaderos. Glasspoint Solar, Inc. (US). 2019. [ES2727278](#)

Un sistema de recogida solar, que comprende:

un recinto (25) con una superficie transmisiva posicionada para transmitir la radiación solar;

un receptor posicionado debajo de la superficie transmisiva, incluyendo dicho receptor un conducto alargado (12) que transporta un fluido de transferencia de calor, el conducto alargado (12) tiene un primer punto que es fijo en relación con el recinto, y un punto no fijo que es móvil con la expansión térmica del conducto alargado (12); y

un suspensor (16) del que está suspendido el punto no fijo del receptor debajo de la superficie transmisiva mediante elementos de suspensión flexibles (2), donde el conducto receptor (12) está configurado para estar: horizontal cuando el conducto receptor (12) tiene una primera temperatura; e inclinado en relación con la horizontal cuando el conducto receptor (12) tiene una segunda temperatura inferior a la primera temperatura, comprendiendo además el sistema:

un reflector (6) posicionado para recibir la radiación solar dentro del recinto (25) a través de la superficie transmisiva, y directamente por lo menos una parte de la radiación en el receptor (12), donde el reflector (6) está suspendido del receptor a una distancia fija, y sube y baja con el conducto receptor (12), manteniendo así el enfoque.

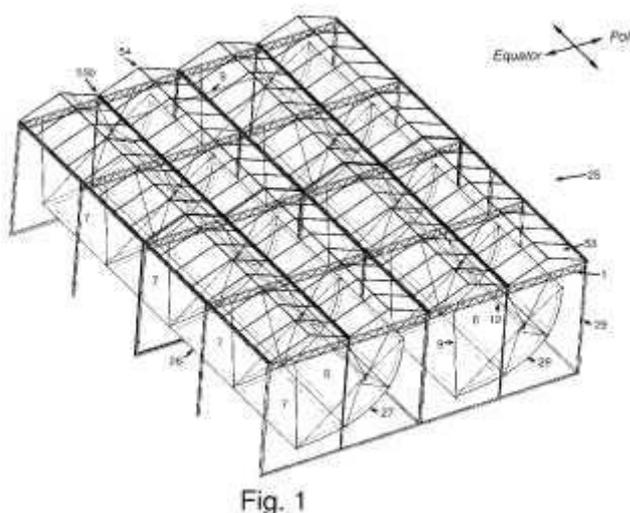


Figura 42. Ilustración de la patente ES2727278

Construcción de módulos solares. S. E. Track AG (CH). 2019. [ES2715723](#)

Construcción de módulos solares, que comprende al menos una unidad de soporte piramidal con una base (2) triangular y superficies laterales (3) triangulares, así como unidades fotovoltaicas previstas al menos en una de las superficies laterales (3) de la unidad de soporte, caracterizada por que

- la unidad de soporte está realizada como marco de soporte (1) que configura la base (2) triangular por medio de travesaños de base (2') y las superficies laterales por medio de travesaños laterales (3'),

- al menos una de las superficies laterales (3) está revestida con un material flexible, el material flexible teniendo una de las siguientes características: transparente, reflectante, con textura, absorbente acústico y

- las unidades fotovoltaicas de al menos una de las superficies laterales (3) están fijadas sobre el material flexible en forma de módulos solares (7) flexibles.

La patente describe una aplicación para invernaderos.

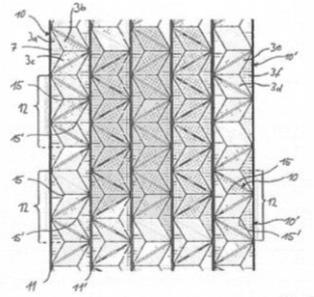


Figura 43. Ilustración de la patente ES2715723

La actividad en cuanto a patentes registradas a nivel nacional es escasa, y llama la atención el elevado % de patentes de propiedad extranjera registrada para aplicaciones en nuestro país.

CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño experimental.

El estudio se realizó en el sureste de España en un invernadero tipo “*multitúnel a dos aguas*” con orientación Norte –Sur, de superficie total en planta de 2.415 m² (57.5 m de largo y 42.0 m de ancho), situado en el Centro Experimental Tecnova, ubicado en Paraje Cerro Gordo s/n Viator, Almería, España (36°53’44.23” N, 2° 22’ 31.35” W, 185 m sobre el nivel del mar).

La estructura de invernadero utilizada, es un invernadero diseñado y patentado por FUNDACION TECNOVA (Figura 44). Este invernadero fue diseñado y patentado por el equipo de investigación (Galera Quiles, M.C, **López Díaz, G.** y Villegas Oliva, M.M) del Centro Tecnológico TECNOVA bajo el marco del proyecto “Gestión Energética Integral de Sistemas de Cultivo bajo Invernadero”, financiado por la Consejería de Innovación Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía, bajo el Programa de incentivos de los Agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento y su convocatoria para el periodo 2008-2013 (Expte. 2009-26365).

El diseño de la estructura fue realizado para permitir desde el punto de vista estructural la colocación de placas fotovoltaicas de silicio amorfo en su cubierta, sin embargo, no se diseñó con el objeto de optimizar la proyección de sombras sobre el cultivo o maximizar el rendimiento fotovoltaico. El estado inicial del invernadero cuando se planteó el diseño experimental para la presente tesis, era el mostrado en la Figura 44, con 6 paneles fotovoltaicos de silicio amorfo instalados sobre la cubierta en la vertiente Este del invernadero.



Figura 44. Vista exterior del invernadero SOLNOVA antes de la instalación de sombreado para el ensayo.

Las características estructurales pueden ser consultadas en el ANEXO III.PATENTE SOLNOVA de la presente tesis. Se resumen a continuación las características más reseñables:

La estructura está formada por tubos de acero galvanizado. El techo está formado por 6 túneles de 7 m de ancho (Figura 45). La altura mayor en la cumbre del invernadero es de 6.63 m; la altura menor en el canal de recogida de agua de lluvia es de 5 m.

Una vez planteado el diseño de tratamientos de sombreado para la toma de datos (15%, 30% y 50% + control 0%) se realizaron las modificaciones sobre la cubierta del invernadero, generando los sombreados proyectados con una nueva instalación de placas fotovoltaicas (6 preexistentes + 30 adicionales) y láminas de polietileno opacas simulando el efecto de las placas sobre la radiación recibida por el cultivo. Adicionalmente se instalaron zonas de policarbonato transparente para poder fijar los diferentes materiales con mayor facilidad.

Las dimensiones de los 36 módulos fotovoltaicos son 1.65 m de largo y 1.00 m de ancho. Los módulos se instalaron en grupos de 2 unidades tal y como se muestra en la Figura 45. Las láminas de polietileno de alta densidad de color negro (opacas) tienen idénticas dimensiones y transmisión de radiación solar a la de los módulos fotovoltaicos.

La configuración final de las cubiertas del invernadero es la siguiente: La cubierta del invernadero es de plástico en toda la superficie de las zonas laterales y frontales; en cambio, la cubierta del techo está compuesta por plástico, laminas fotovoltaicas, láminas de polietileno de alta densidad negro (opacas), láminas de policarbonato ondulado transparente, tal y como se muestra en la Figura 45. La colocación de las láminas de polietileno negras en el techo del invernadero tiene como objetivo simular el sombreado que producirían módulos fotovoltaicos opacos. En la Figura 46 se muestra la disposición de las láminas de polietileno opacas en cubierta del tratamiento del 50% de sombra. El plástico de cubierta es de polietileno térmico (LDPE) fabricado en tricapa mediante coextrusión. La capa exterior del plástico es resistente, antiadherente y posee aditivos contra radiación UV. La capa intermedia es de alto contenido en EVA, aportando termicidad. La capa interior (inferior) aporta difusión de luz y posee estabilizantes resistentes a fitosanitarios. El grosor del plástico es de 200 μm , de color blanco translúcido con una transmisión de luz visible del 84% y con una vida útil de 3 años.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

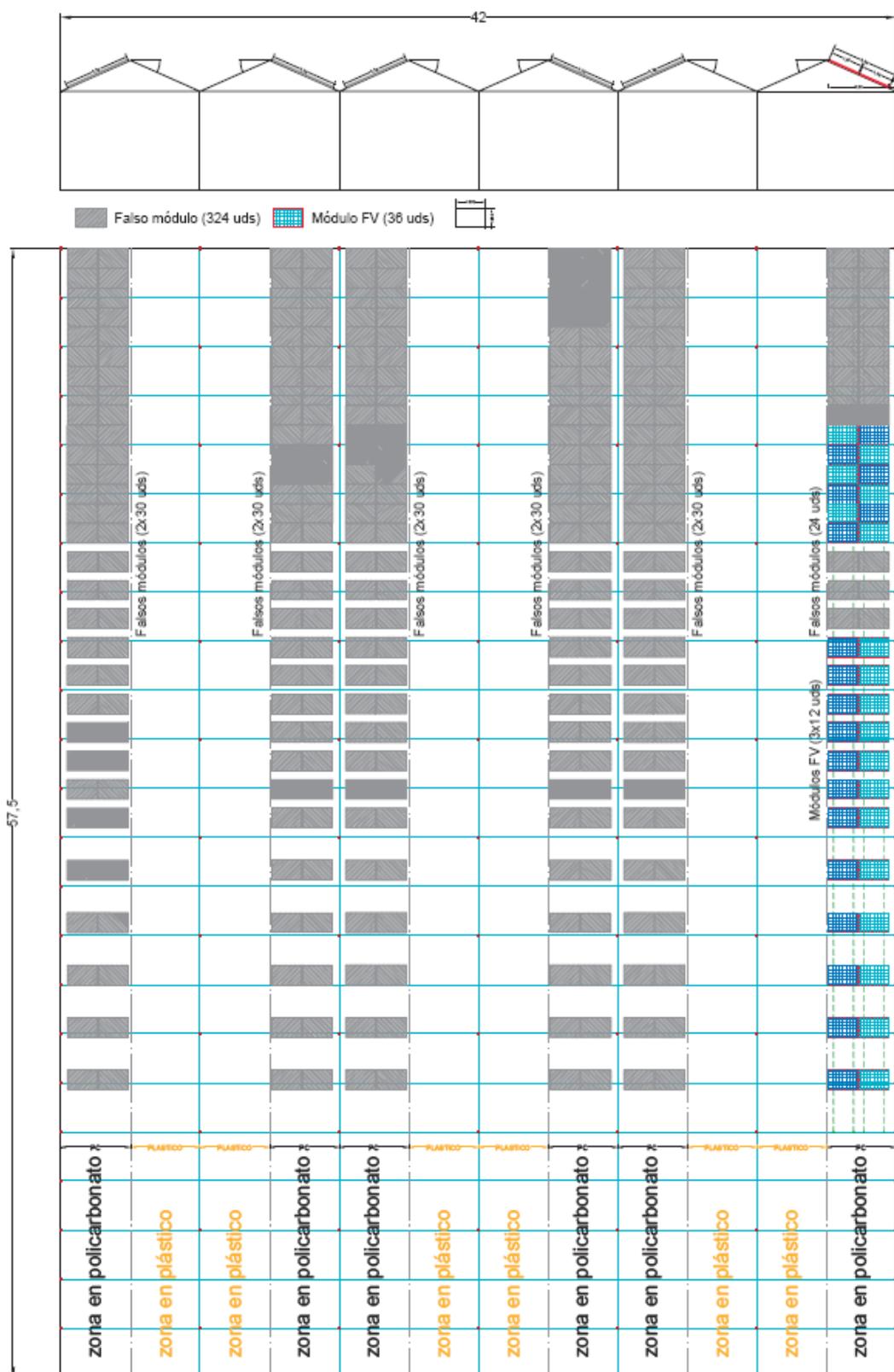


Figura 45. Disposición de los módulos fotovoltaicos y planchas de polietileno sobre cubierta del invernadero.



Figura 46. Detalle de la ubicación de las láminas de polietileno negras opacas en el exterior de la cubierta del invernadero del tratamiento del 50% de sombra.

La ventilación del invernadero fue pasiva, formada por ventanas laterales extensibles de 2.5 m de alto distribuidas a lo largo del perímetro de la estructura y 5 ventanas cenitales de 50 m de largo y 1 m de ancho, cuya apertura y cierre se realizar automáticamente en función del clima del invernadero (T^a y Hr). La superficie total de ventilación fue del 20.7% de la superficie invernada. Todas las aperturas de ventana estaban protegidas con mallas anti-insectos de 20 x10 hilos cm^{-1} (50 mesh).

Para evaluar el efecto de diferentes niveles de sombreado que producirían módulos fotovoltaicos ubicados en el exterior del techo de invernadero se realizó un **diseño experimental compuesto de tres tratamientos de sombra** con 15%, 30% y 50%. Los tres porcentajes de sombra se compararon con un tratamiento 0 testigo, en el cual no se colocaron paneles fotovoltaicos o láminas de polietileno opacas en cubierta (0% sombra). Los tratamientos de sombra tenían una superficie de 630 m^2 y la del control fue de 525 m^2 (Figura 47). En cada tratamiento se realizó una evaluación y control de parámetros climáticos y del rendimiento del cultivo y calidad de fruto.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

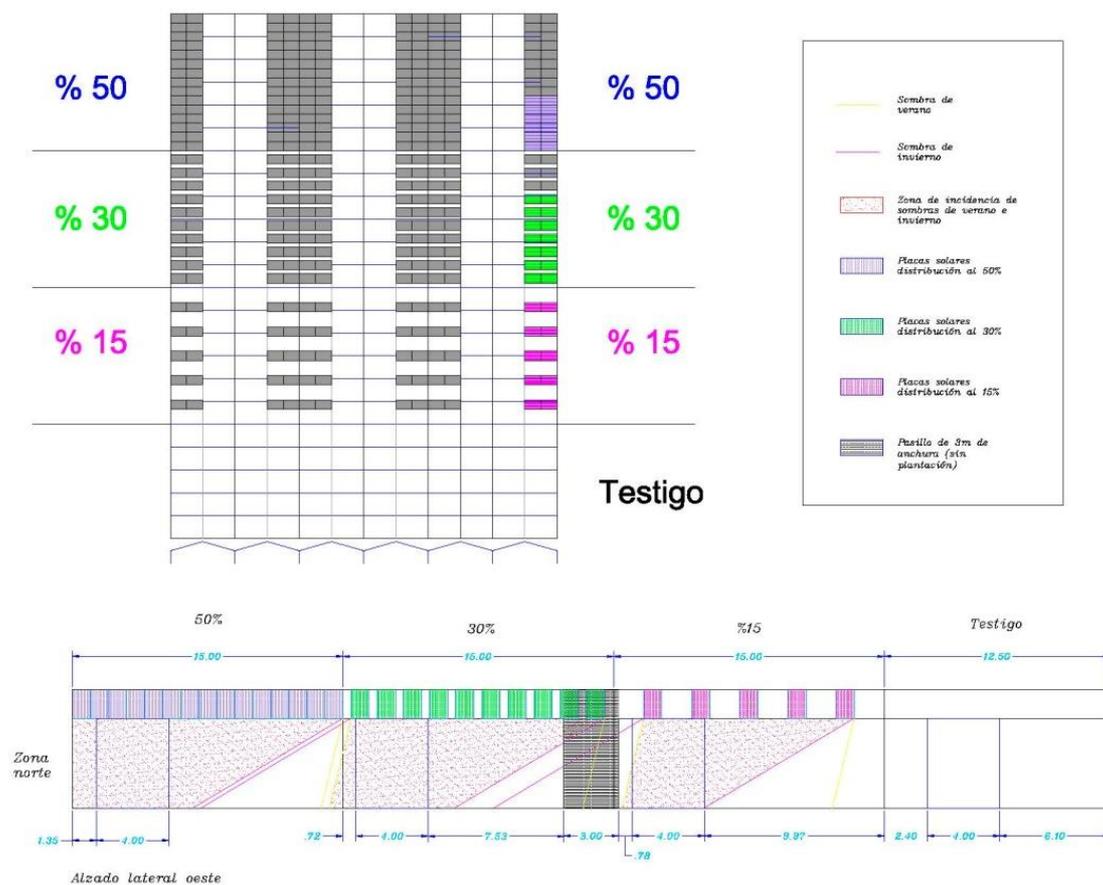


Figura 47. Disposición de los módulos fotovoltaicos y planchas de polietileno sobre cubierta del invernadero.

3.2. Condiciones de cultivo.

La investigación se realizó durante el ciclo de producción 2014-2015 en un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. ‘Pitenza’ (de crecimiento indeterminado), injertado sobre el portainjerto ‘Maxyfort’. Las plantas fueron trasplantadas el 17 de septiembre de 2014 cuando disponían de 35 días de edad después de su germinación en semillero industrial especializado. La poda y sistema de formación de las plantas fueron a un tallo y se les eliminó la yema terminal a 65 días antes de la última cosecha y finalización del cultivo, que se produjo el 14 de mayo de 2015. El despunte o descabezado del tallo principal al final del ciclo de cultivo es una práctica habitual en variedades de tomate de crecimiento indeterminado con sistemas de formación a uno o varios tallos. Esta técnica consiste en eliminar la yema terminal para evitar que se sigan desarrollando nuevos tallos, hojas, flores y frutos. Con ello se evita gasto energético de la planta en desarrollo de nueva parte vegetativa cuyos frutos inmaduros no serían recolectados, y además, se favorece el desarrollo de los frutos presentes en la planta al final del ciclo de cultivo que sí serían recolectados y comercializados.

Las plantas fueron cultivadas sobre sustrato de fibra de coco, situado sobre plataformas a una altura de 1 m del suelo (Figura 48). Este sistema de cultivo hidropónico es de uso habitual en la zona productora del sureste español. La densidad de plantación fue de 1.72 plantas · m⁻². El agua y los nutrientes se aplicaron al cultivo mediante riego por goteo (fertirrigación). Las labores culturales de poda, deshojado, tutorado, fertirriego, etc.; fueron las que habitualmente se realizan en el sureste español en invernadero sobre cultivo hidropónico de tomate (López-Aragón et al, 2018) y (Aroca-Delgado et al, 2019)



Figura 48. Disposición del sustrato de fibra de coco en el invernadero en el que se realizó la investigación.

3.3. Medida de parámetros climáticos.

La radiación exterior se midió mediante un sensor que registró, de forma continua y durante todo el periodo de estudio, la radiación en $W \cdot m^{-2}$ y dentro del espectro de 440 a 970 nm. El sensor estaba ubicado en una estación meteorológica situada en el exterior del invernadero.

La estación registró los datos de manera continua con una periodicidad de 5 minutos entre medidas (Figura 49) durante la duración del ensayo.

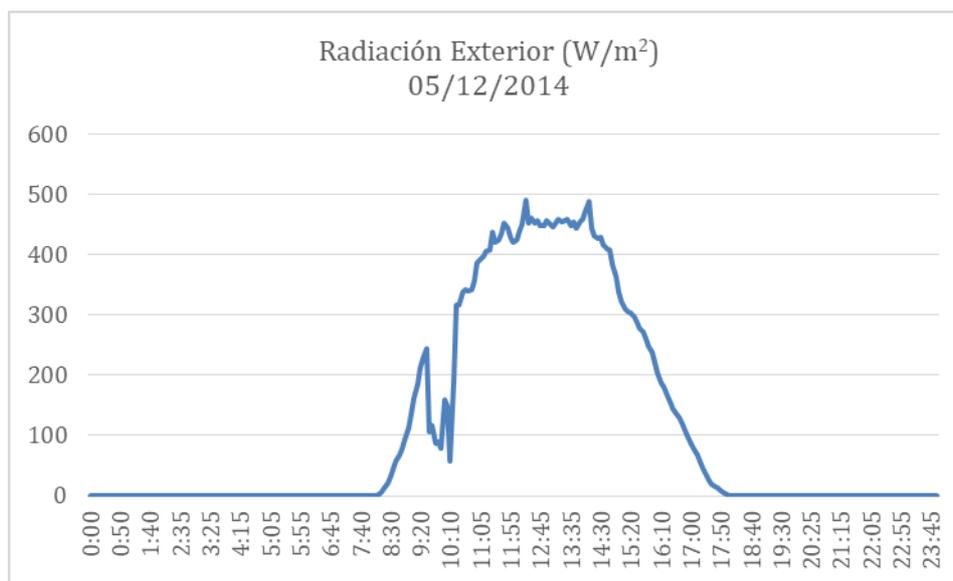
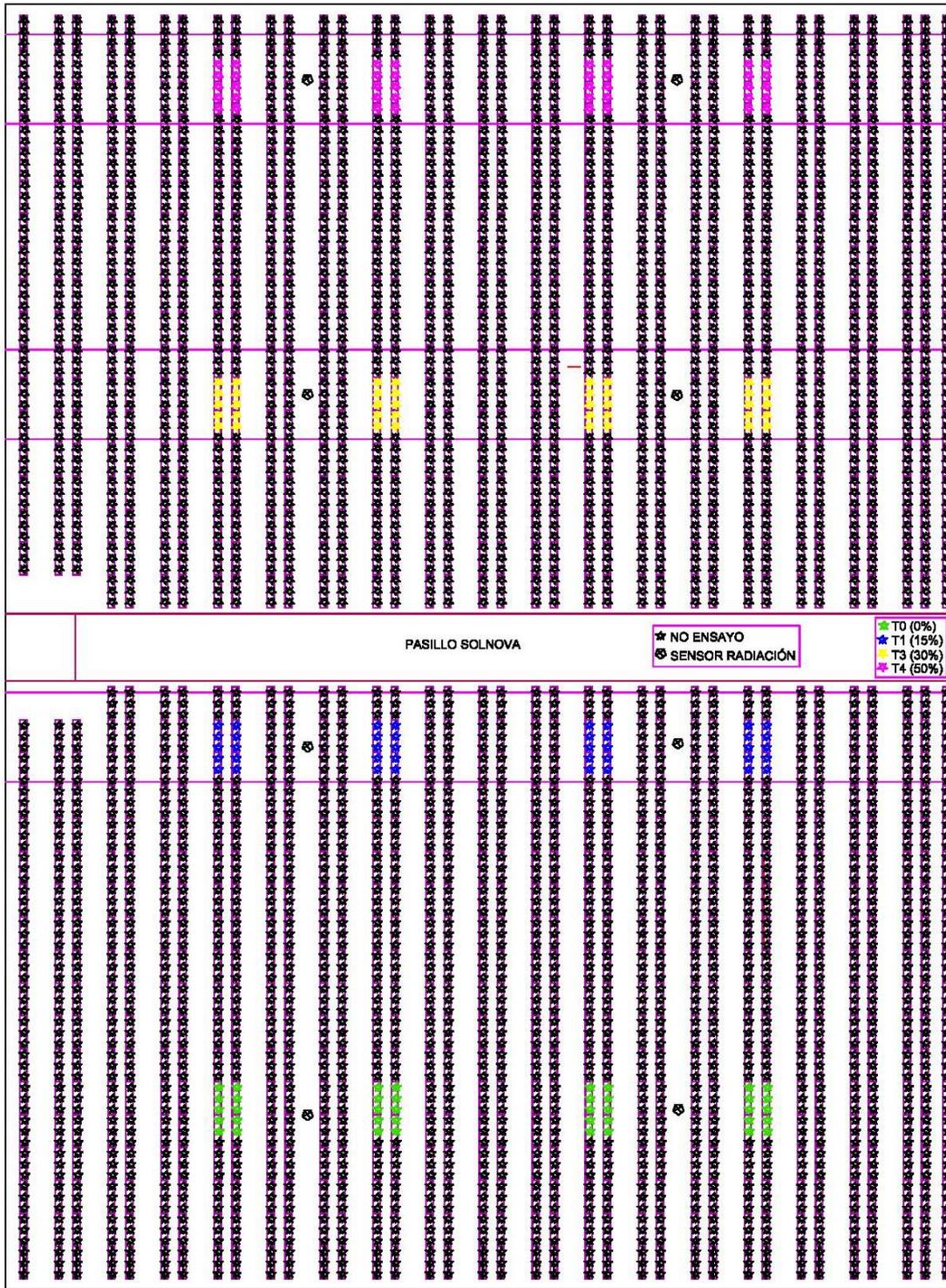


Figura 49. Registro de datos de radiación exterior del día 05/12/2014

En el interior del invernadero se midió la radiación fotosintéticamente activa (PAR; 400-700 nm). En cada tratamiento (0%, 15%, 30% y 50%) se instalaron dos sensores de radiación modelo LI-1500 Light Sensor Logger (Figura 50). Cada sensor se colocó sobre un soporte fijo y previamente nivelado. Este soporte estaba situado sobre un poste telescópico que permitía modificar la altura del sensor. La altura del sensor fue variando en función del crecimiento del cultivo, de modo que siempre estaba por encima de las plantas (Figura 51).

La temperatura exterior e interior del invernadero se registró de forma continua y durante todo el periodo de estudio con una sonda PT100 colocada en la estación meteorológica localizada en la parcela.

En el interior del invernadero colocaron a la misma altura 8 sensores de temperatura (2 por tratamiento), modelo Scort log. En la (Figura 51) se muestra el detalle de la ubicación de un sensor de temperatura en el interior del invernadero.



Sur

Figura 50. Disposición de las plantas de cada repetición y tratamiento en el invernadero en el que se realizó la investigación. También se indica la distribución de los sensores de radiación en el interior del invernadero.



Figura 51. Detalle de la ubicación de los sensores de radiación (izquierda), temperatura (derecha).

3.4. Medida de parámetros agronómicos.

El pH y la conductividad eléctrica (CE) de la solución del sustrato de cultivo en cada tratamiento y repetición se midieron semanalmente durante todo el ciclo de cultivo. La primera medida se realizó a los 23 días después de trasplante (d.d.t.), a partir de esa fecha se tomaron datos de los mismos de forma semanal. La solución nutritiva se extraía con jeringa del sistema de drenaje de las bolsas de sustrato para su posterior medida en el laboratorio del Centro Experimental Tecnova. El equipo utilizado fue Elmeco pH and CE meter (Leidschendam, the Netherlands) con una resolución de 0.01 valores de pH y 0.03 mS a 20°C.

Estos datos fueron recogidos en estadillos en cada uno de los tratamientos (Figura 52).

El rendimiento y calidad del cultivo se midió durante todo el ciclo de cultivo. La producción total y comercial se determinó sobre 10 plantas en cada replica de cada tratamiento de sombra (0%, 15%, 30% y 50%). Las plantas estaban dispuestas en 2 líneas de cultivo de 5 plantas en la zona central de cada parcela estudiada tal y como se muestra en la Figura 50.

La disposición de los bloques de tratamientos y repeticiones, se representa esquemáticamente en la siguiente matriz:

T3R1	T3R2	T3R3	T3R4
T2R1	T2R2	T2R3	T2R4
T1R1	T1R2	T1R3	T1R4
T0R1	T0R2	T0R3	T0R4

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Donde:

T0: tratamiento testigo, 0% de sombra

T1: tratamiento 1, 15% de sombra

T2: tratamiento 2, 30% de sombra

T3: tratamiento 3, 50% de sombra

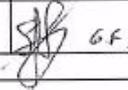
 HOJA DE TRABAJO DETERMINACIÓN DEL pH		Ed.2			
Proyecto: C-E. TECNOMA					
Ensayo AGUA (PH)					
Fecha recepción:	24/11/14	Validación de resultados			
Fecha inicio análisis:	24/11/14	Iniciales y Firma 			
Fecha fin de análisis:	24/11/14				
Equipos utilizados:	E 0052 pHímetro Potenciómetro Crison; E0057 Agitador magnético IKA				
Fecha	Código	Tiempo/Trat.	Replica	Valor de pH	Observaciones
24/11/14	14/233/C	T0	R1	7,32	
			R2	7,29	
			R3	7,36	
			R4	7,08	
		T1	R1	6,85	
			R2	7,27	
			R3	7,17	
			R4	7,21	
		T2	R1	6,80	
			R2	7,01	
			R3	6,98	
			R4	7,05	
		T3	R1	7,19	
			R2	7,10	
			R3	7,17	
			R4	6,89	
Observaciones:					

Figura 52. Estadillo de recogida de datos de pH del sustrato en campo

Las plantas estaban ubicadas tal que la incidencia de la sombra era máxima con respecto a la variación de la inclinación de los rayos solares a lo largo del ciclo de cultivo (Figura 47). Las plantas sobre las que se realizó la toma de datos fueron identificadas para garantizar la trazabilidad de cada tratamiento y repetición.

El control de producción y el diámetro del fruto se realizaron en todas las recolecciones del ciclo de cultivo. Se realizaron 8 recolecciones cuya secuencia temporal fue 113, 131, 141, 161, 181, 209, 222 y días después del trasplante (d.d.t.). En la última recolección (239 d.d.t.) se recolectaron y cuantificaron todos los frutos que estaban presentes en la planta, es decir, frutos verdes y frutos con madurez óptima para la comercialización. Dentro de los frutos verdes, se diferenciaron entre frutos verdes inmaduros que no se comercializaron, y frutos verdes que terminaron de madurar en cámara antes de su comercialización.

Una vez recolectados los frutos de cada parcela elemental de 10 plantas, se introdujeron en bolsas identificadas con un código para garantizar la trazabilidad de cada muestra con su correspondiente tratamiento y repetición. En el Centro Experimental Tecnova se determinó el peso del rendimiento y el número de frutos cosechados en cada parcela elemental, distinguiendo entre frutos comerciales y no comerciales. Para la medida del peso se utilizó una balanza Radwag WLC30/F1/R (Radwag, Radom, Poland) con una capacidad máxima de 30 kg y una precisión de 0.5 g. (Figura 53, izquierda).

De los frutos comerciales recolectados se extrajo una muestra de 18 frutos por repetición (72 frutos por tratamiento) sobre los que se determinó el diámetro del fruto del fruto mediante un calibre digital Mitutoyo (Mitutoyo Corporation, Japan).



Figura 53. Medida peso (izq) y textura (derecha) de los frutos

En algunas recolecciones se determinó la calidad del fruto en una muestra de los frutos comerciales recolectados (18 frutos por repetición). En el ANEXO I, se puede consultar,

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

a modo ilustrativo, los datos registrados durante el ensayo para su posterior tratamiento estadístico.

En concreto, la calidad del fruto se evaluó a 113, 131, 161, 181, 209, 222, d.d.t. Los parámetros evaluados de forma individual para cada fruto fueron firmeza, color, Sólidos Solubles Totales (SST) y pH del fruto. Estas evaluaciones se realizaron en el Laboratorio CT TECNOVA, ubicado en Avenida de la Innovación, 23. 04131. Parque Científico – Tecnológico de Almería, Almería, España.

La firmeza del fruto se evaluó mediante un analizador de textura Brookfield CT3 (Brookfield Engineering Laboratories, INC. Middleboro, Massachusetts, USA). Cada fruto fue comprimido con una sonda de 4,5 mm a una velocidad de 2 mm/s y la fuerza máxima expresada en Newtons (N) fue registrada, (Figura 53, derecha).

Los Sólidos Solubles Totales (SST) y el pH del fruto se determinaron realizando una medida sobre el jugo de cada fruto. Para los SST (°Brix) se utilizó un refractómetro digital ATAGO PAL-1 (ATAGO CO., LTD, Tokio, Japón) con una resolución de 0.2 °Brix. El refractómetro fue calibrado periódicamente con una solución de sacarosa al 10% (Merck KGaA * 64271 Darmstadt * Alemania). Para el pH se utilizó un medidor de pH CRISON GLP22 (CRISON INSTRUMENTS S.A., Alella, Barcelona, España).

La determinación del color (Figura 54) se hizo mediante el sistema CIELAB utilizando un Minolta CR-400 Chroma Meter (Konica Minolta Sensing Inc. Osaka, Japan). El sistema CIELAB permite representar cualquier color mediante tres coordenadas de color L^* , a^* y b^* . La luminosidad L^* va de 0 (negro) a 100 (blanco), a^* es el eje rojo-verde y b^* es el eje amarillo-azul. Para identificar la intensidad del color se utilizó la ecuación descrita por (Arana, 2012).



Figura 54. Medida del color en frutos de tomate

3.5. Análisis de datos.

Los datos de rendimiento total, comercial, número de frutos y calidad de fruto se sometieron, según la metodología descrita por (McIntosh, 1983), (Montgomery, 1991.), (Gómez y Gómez, 1984), al análisis de la varianza (ANOVA) según el modelo lineal aditivo $Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$ donde Y_{ij} es la observación ij-ésima, μ es la media global, α_i es el efecto del i-ésimo tratamiento de sombra (0%, 15%, 30% y 50%), β_j es el efecto del j-ésimo bloque (repetición) y ε_{ij} es el error experimental. El p-valor se obtiene de la relación entre α_i y el error experimental ε_{ij} . Esta es la metodología clásica de análisis de la varianza para un diseño en bloques aleatorizados y cuyo modelo está estandarizado. En todos los análisis se verificó que los datos cumplían con las hipótesis de normalidad y homogeneidad de varianzas.

La comparación entre los resultados medios para cada tratamiento se realizó utilizando las pruebas de rango múltiple de mínimas diferencias significativas (LSD) al que se le aplicó la corrección de Bonferroni (Freund et al, 2010). La corrección de Bonferroni se calculó según lo descrito por (Armstrong et al, 2014). Como se estudian 4 tratamientos (0%, 15%, 30% y 50%), se realizan 6 pruebas independientes y la hipótesis nula (no hay diferencia significativa) es válida para las 6 comparaciones; por tanto, la probabilidad de que al menos una de las 6 pruebas sea significativa (error de tipo I ó alfa) ya no es de $\alpha = 0.05$, sino de $\alpha = 0.265$. Por tanto, el valor de corrección de Bonferroni considerado en los análisis fue 0.0085 (99.15).

El tratamiento estadístico de datos se ha realizado con los softwares IBM SPSS Statistics Versión 23 y Statgraphics Centurion SVII-X64.

3.6. Análisis económico y de rentabilidad

3.6.1. Metodología y valores utilizados en el análisis

Para el análisis económico de la inversión se ha utilizado el cálculo de los valores del VAN, TIR y Plazo de Recuperación o *Pay-back* de la inversión. Esta metodología es comúnmente aceptada y utilizada en el análisis de inversiones de proyectos de diferentes ámbitos.

Para la descripción de las variables se ha utilizado la dada por (Brealey et al, 1999), en su tratado de Principios de Dirección Financiera:

“VAN: Valor Actual Neto, se calcula como el Valor actual de los flujos de tesorería del proyecto menos la inversión inicial”. Para ello, necesitaremos calcular varios valores:

- **“Flujos de caja o cash-flow: Tendremos que predecir, durante la vida del proyecto o de la inversión, los flujos de caja (ingresos – gastos) que generará la inversión”** que estamos valorando, en este caso, la instalación de paneles fotovoltaicos en cubierta del invernadero.
- **“Estimar el coste de oportunidad del capital: es decir, la tasa de rendimiento esperada dejada de lado por invertir en el proyecto”.** La decisión de realizar la inversión en el proyecto, se compara con otro tipo de inversiones u opciones en el mercado para rentabilizar el dinero, como letras del Tesoro, fondos de inversión de entidades financieras, etc.

En la presente tesis, hemos utilizado una tasa de rendimiento del 4,77%, basada en el método CAMP (metodología para calcular el umbral mínimo del coste de capital) como expectativa de rentabilidad de la inversión frente a escenarios actuales de opciones para la inversión. Este modelo desarrollado por (Sharpe, 1964), está sustentado en ciertos requisitos como son:

- La no existencia de costes de transacción.
- Los inversores poseen aversión al riesgo.
- Los proyectos de estudio tienen horizontes similares.
- No existen limitaciones para invertir en activos libres de riesgo como son los bonos del tesoro a 10 años.
- Los promotores poseen homogeneidad de expectativas en la rentabilidad y el riesgo.

La tasa de rendimiento se calculará sobre una tasa de rentabilidad libre de riesgo (por ejemplo, un bono del tesoro a 10 años de 0,162%) y una prima de riesgo del mercado (valor de 6,4% en función de lo recogido por Fernández, 2019). La prima de riesgo del mercado se corrige con un coeficiente (Beta desapalancada), que mide la covarianza existente entre el mercado y la rentabilidad de la actividad. El coeficiente Beta, ha sido considerado según los estudios de Aswath Damodaran, para el sector Green & Renewable Energy sitúa la β en 0,72). Con los datos expresados, obtenemos un valor de la tasa de rendimiento del 4,77%.

- “Utilizar el coste de oportunidad del capital para descontar flujos de tesorería futuros”. Para calcular el valor actual de un ingreso futuro descontamos el flujo de caja al coste de oportunidad del capital.

Análíticamente, calculamos el valor del VAN según la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+i)^j} - K$$

Donde:

K= inversión inicial

n= vida económica de la inversión, en nuestro caso 25 años

F_j= Flujo de caja en el año j

i= Tasa de actualización (interés) o tasa de rendimiento esperada

Teóricamente, se dice que, si el VAN es mayor que 0, se acepta la propuesta de inversión (Altuve, 2004,).

“TIR: Tasa Interna de Rentabilidad, se define como la tasa de actualización o descuento que hace que el VAN sea igual a cero”. Se utiliza de manera complementaria al criterio del VAN para analizar la conveniencia de las inversiones. En este caso, el

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

criterio será *“invertir en aquellos proyectos que ofrezcan una tasa de rentabilidad mayor que el coste de oportunidad del capital”*.

$$\sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1 + TIR)^j} - K = 0$$

Si el valor de la TIR es mayor que la tasa de actualización la decisión de inversión será positiva, en caso contrario, negativa.

“Plazo de Recuperación o Pay-back de la inversión, es el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial, es decir, el tiempo que transcurre hasta que los flujos de tesorería permiten recuperar el desembolso inicial del proyecto”.

3.6.2. Escenarios contemplados

El análisis económico y de rentabilidad sobre la instalación de placas fotovoltaicas se ha llevado a cabo sobre diferentes supuestos teóricos, con objeto de analizar la viabilidad de las instalaciones de placas solares fotovoltaicas sobre invernaderos tipo en la provincia de Almería. Para ello, se han analizado los siguientes escenarios:

- A. Instalación de placas fotovoltaicas ajustada al consumo energético de la explotación agrícola: régimen de autoconsumo con excedentes acogido a compensación.

En la metodología utilizada para el análisis de la inversión, se han considerado los siguientes supuestos y valores:

- **Superficie del invernadero**, se considera una superficie de invernadero de 1 ha.
- **Nivel tecnológico y productivo del invernadero**, el consumo energético del invernadero depende en gran medida de su nivel tecnológico, el tipo de invernadero, la ventilación, climatización activa (calefacción o refrigeración), sistemas de humificación y pantallas son elementos que determinan los costes de producción, así como los rendimientos del cultivo. La explotación de invernadero media en Almería, se caracteriza por ser un invernadero de baja integración tecnológica, con unos consumos energéticos bajos y una productividad limitada. Así los datos medios ofrecidos por Observatorio de Precios de Mercado de la Junta de Andalucía, los costes de producción en la campaña 18/19 en hortícolas (tomate ciclo largo) protegidos, sitúan el gasto medio por hectárea en 2.290 € y un rendimiento medio neto en el cultivo de tomate de 13,5 kg/m².
- Para **el cálculo del consumo energético medio** del invernadero en Almería, se han considerado los valores de precio medio de la tarifa One luz de Endesa como distribuidora de referencia (Término potencia + Término Energía, sin impuestos).
- **La superficie fotovoltaica a instalar se ajusta a las necesidades energéticas del invernadero.** Para el cálculo de la superficie fotovoltaica necesaria para

Para cubrir las demandas energéticas del invernadero se ha considerado un módulo fotovoltaico monocristalino comercial modelo “Panel Solar 400W Perc Monocristalino ERA”, con una superficie de módulo de 1,98 m² y una potencia pico de 400 Wp.

Para el cálculo de la instalación fotovoltaica necesaria se ha utilizado la herramienta oficial PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) de la Comisión Europea, disponible en la página web: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#PVP.

Se ha considerado, que durante la instalación de las placas, se proporciona un ángulo óptimo para la producción fotovoltaica, mediante estructuras portantes para obtener una inclinación optimizada para nuestra latitud (35°) y unas pérdidas del sistema del 14%.

- **Precio medio del kWp instalado:** Se consideran los datos aportados por (Donoso, 2018), para sistemas fotovoltaicos de 5-10 kWp, conectados a red. Considerando el precio de referencia de 1,5 €/ Wp.
- Consideramos la **instalación dentro del “RD 244/2019 del 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica”**.
- El **precio del kW compensando**, para este tipo de instalaciones, se considera dentro del mercado regulado, exclusivo para potencias menores de 10kW, y en el que operan una serie de operadores de referencia, considerando el precio del kWh compensado el conocido como PVPC (Precio de Venta del Pequeño Consumidor). Para el supuesto, se escoge como referencia el Plan Tempo Solar de Endesa, según las tarifas contempladas en su página web, con fecha de actualización 9/10/2020. El coste del kWh comprado, se considera como una media (0,14 € /kWh) entre la tarifa normal (0,1588 €/kWh) y la tarifa reducida (0,1191 €/kWh).
- **% de autoconsumo.** Con la instalación de paneles fotovoltaicos, el consumo energético se realiza directamente de la producción de los paneles, siendo el coste energético del kWh nulo. No obstante, se considera un % de desfase entre el consumo energético y la producción fotovoltaica, que, con las tarifas de compensación de excedentes, e instalando contadores inteligentes los kWh producidos en exceso y vertidos a red pueden ser posteriormente consumidos a un precio reducido. Para el supuesto de cálculo, se considera que un **60%** de la Energía generada por las placas fotovoltaicas es consumida directamente por las necesidades energéticas del invernadero (gratuita y libre de impuestos), siendo el resto de Energía, volcada a red y posteriormente recuperada por el agricultor al precio de referencia establecido por la comercializadora, en base al PVPC (precio de referencia 0,047 €/kwh).
- Para el análisis económico de la inversión se han utilizado los valores del VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa Interna de Rendimiento) y Pay- Back, considerando un Tasa de Rendimiento o coste de oportunidad del 4,77% y un

periodo de amortización de las inversiones de 25 años. Calculados los valores respecto al **supuesto inicial**, se han realizado una serie de variantes, expuestas a continuación, con objeto de valorar el impacto de las diferentes variables en la rentabilidad del sistema.

- Variante 1: Angulo de inclinación de las placas. En el supuesto inicial hemos considerado una inclinación óptima de las placas solares (35° para nuestra latitud). Esta inclinación, no obstante, dista mucho de la pendiente de cubierta de un invernadero de Raspa y Amagado de la provincia de Almería, que se sitúa en valores alrededor de 13° en el caso de capillas intermedias y 18° en el caso de las capillas de banda. Se ha analizado el impacto sobre la rentabilidad de respetar la pendiente de la cubierta de un invernadero en Almería, considerando, que se realiza la instalación en las capillas de banda (18°).
- Variante 2: % de autoconsumo. En el supuesto inicial, se ha considerado que un 60% de la Energía generada por las placas fotovoltaicas es consumida directamente por las necesidades energéticas del invernadero (gratuita y libre de impuestos), siendo el resto de Energía, volcada a red y posteriormente recuperada por el agricultor al precio de referencia establecido por la comercializadora, en base al PVPC. Se ha analizado el impacto de considerar un % de autoconsumo del 100%.
- Variante 3: Obtención de subvenciones a la modernización de explotaciones de Andalucía (PDR-A 2014-2020). En el supuesto inicial, se ha considerado que la inversión en placas fotovoltaicas, es asumida por el agricultor con fondos propios. Sin embargo, existen opciones para la financiación de este tipo de inversiones con subvenciones públicas a fondo perdido. Concretamente las inversiones en instalaciones fotovoltaicas en explotaciones agrícolas se encuentran recogidas dentro del marco de la submedida 4,1 del Programa de Desarrollo Rural de Andalucía 2014-2020, cuya convocatoria para la anualidad 2020 fueron publicadas en el BOJA 213 de 4 de Noviembre de 2020. El gasto máximo por inversión subvencionable en función de cada operación vendrá determinado por los costes de referencia que se relacionan en el Anexo V de esta orden, que para módulos fotovoltaicos fijos establece como límite 1 €/Wp.
- Variante 4: Disminución del precio de instalación del Wp. Para el escenario inicial se ha considerado los datos aportados por (Donoso, 2018), para sistemas fotovoltaicos de 5-10 kWp, conectados a red (1,5 €/ Wp). No obstante, estos datos según precios de referencia de mercado actuales son elevados, situándose las instalaciones en torno a 1 €/Wp. Contemplamos este supuesto para obtener una aproximación más realista de la rentabilidad para el agricultor medio almeriense.

B. Instalación de placas fotovoltaicas en invernadero orientado a la venta de energía, con potencias superiores a 100 kWp

En esta segunda hipótesis realizada, se ha considerado que el agricultor realiza una instalación de grandes dimensiones, por encima de los 100 kWp, orientada a la venta de energía a la red.

En este caso, los precios de referencia y las normativas difieren con respecto a los valores planteados en la metodología de la primera hipótesis. En la metodología utilizada para el análisis de la inversión de esta segunda hipótesis, se han considerado los siguientes supuestos y valores:

- **Superficie del invernadero**, se considera una superficie de invernadero de 1 ha, como el considerado en la primera hipótesis.
- **Nivel tecnológico y productivo del invernadero**, se han considerado los valores utilizados en la primera hipótesis.
- **Módulo fotovoltaico y herramienta de cálculo de la instalación**, Para el cálculo de la superficie fotovoltaica necesaria para cubrir las demandas energéticas del invernadero se ha considerado un módulo fotovoltaico monocristalino comercial modelo “Panel Solar 400W Perc Monocristalino ERA”, con una superficie de módulo de 1,98 m² y una potencia pico de 400 Wp. Para el cálculo de la instalación fotovoltaica necesaria se ha utilizado la herramienta oficial PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) de la Comisión Europea, disponible en la página web: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#PVP.

Se ha considerado, que durante la instalación de las placas, se proporciona un ángulo óptimo para la producción fotovoltaica, mediante estructuras portantes para obtener una inclinación optimizada para nuestra latitud (35°) y unas pérdidas del sistema del 14%.

- **Precio medio del kWp instalado**: Se consideran los datos aportados por (Donoso, 2018), para sistemas fotovoltaicos de mayores de 100 kW y por debajo de 1 MW conectados a red, considerado el valor de 0,75 €/Wp.
- Consideramos la **instalación dentro del “Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.”**.
- En este caso, el **precio de venta de la energía**, estaría regulado dentro del mercado de electricidad, gestionado por el operador del mercado OMIE, que gestiona el mercado diario y el mercado intradiario de la energía. Según el Informe Integrado OMI 2019 el precio medio diario del mercado diario de la energía se situó en 2019 en **47,68 €/MWh** en España.
- **Porcentajes de sombreado y efectos sobre el rendimiento agrícola**. Se han considerado 4 alternativas de sombreado creciente en este escenario, valorando

no solo los ingresos por venta de energía que obtendría el agricultor sino también las pérdidas derivadas de la pérdida de producción agrícola como consecuencia del sombreo. Se resumen en la (Tabla 4) los valores contemplados para el cálculo de los escenarios:

Alternativa	% sombreo	Producción estimada Kg/m ²	Ingresos estimados actividad agrícola (€)
1	10%	13,2	87.120,00 €
2	15%	11,4	75.240,00 €
3	30%	9,4	62.040,00 €
4	50%	7,8	51.480,00 €

Tabla 4. Alternativas de sombreo e ingresos estimados de la actividad agrícola

Para los niveles de producción estimada se han considerado los resultados obtenidos en el ensayo realizado durante la tesis en cuanto a rendimiento del cultivo en cada escenario de sombreo. Se ha considerado el precio medio obtenido por el agricultor durante la campaña de tomate 2019/2020 de 0,66 €/m² ofrecido por el Observatorio de Precios y Mercados de la Junta de Andalucía.

- Para el análisis económico de la inversión se han utilizado los valores del VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa Interna de Rendimiento) y Pay-back, considerando una Tasa de Rendimiento o coste de oportunidad del 4,77% y un periodo de amortización de las inversiones de 25 años.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1. Efecto del sombreado de las láminas fotovoltaicas sobre la temperatura y la radiación PAR

La radiación solar del exterior del invernadero fue disminuyendo progresivamente en intensidad de radiación máxima y el número de horas solares desde el inicio del cultivo (17 de septiembre) hasta diciembre. A partir de diciembre la radiación exterior fue aumentando progresivamente hasta la finalización del cultivo en mayo (Figura 55).

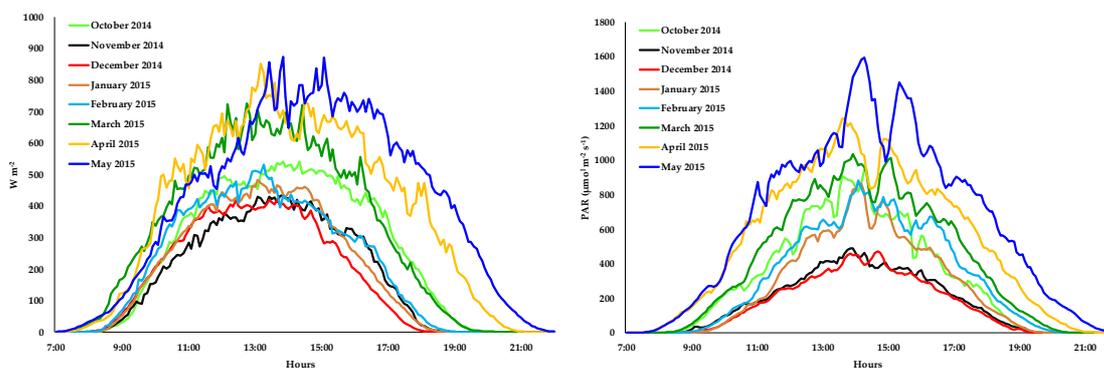


Figura 55. Evolución de la radiación media mensual ($W m^{-2}$) del exterior del invernadero para el periodo de estudio (izquierda). Evolución de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) media mensual del interior del invernadero en el tratamiento control (0% sombra) el periodo de estudio (derecha).

La radiación fotosintéticamente activa del interior del invernadero también fue estudiada. En la Figura 55 se muestra la radiación PAR para el tratamiento control (0% de sombra). La variación de la intensidad de radiación máxima y el número de horas de exposición a radiación PAR mostró un comportamiento similar al descrito en la radiación exterior, siendo la menor radiación en diciembre y máxima en mayo.

La Figura 56 muestra, para el periodo de estudio, la evolución diaria media mensual de la reducción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) que produce el sombreado estudiado (15%, 30% y 50%) con respecto a la ausencia de sombra (0%). En todos los meses observa una reducción de radiación PAR proporcionalmente superior a la superficie de sombreado exterior. En concreto, la reducción del 15%, 30% y 50% de superficie de sombra produjo una reducción de la radiación PAR real del 28.8%, 46.6% y 66.3% respectivamente (Figura 57). En general, en los tratamientos de 15%, 30% y 50% de sombreado la reducción de radiación PAR fue proporcionalmente superior a la superficie de sombreado exterior.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

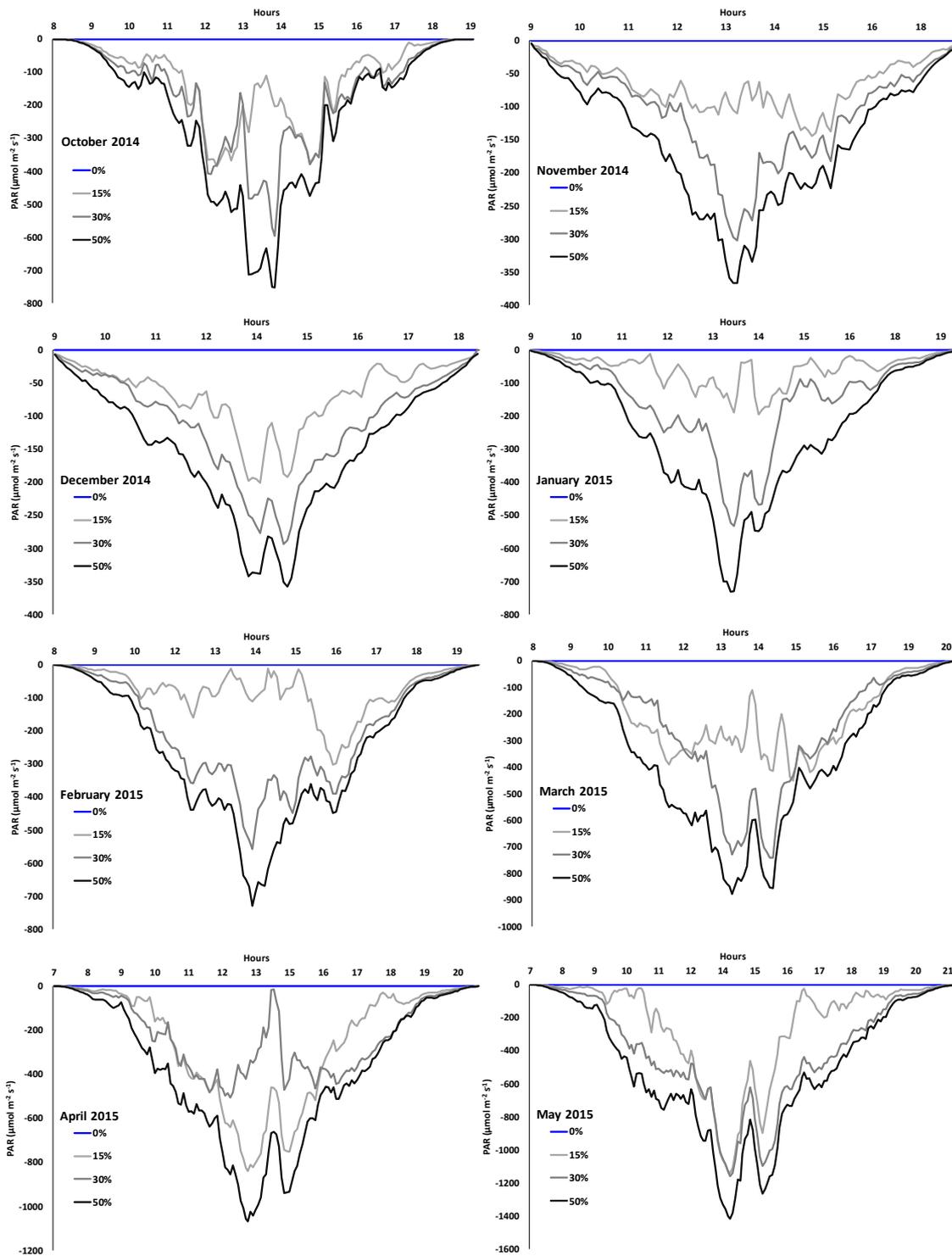


Figura 56. Evolución diaria media mensual de la reducción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) que produce el sombreado (15%, 30% y 50%) con respecto a la radiación del control (0%) para el periodo de estudio.

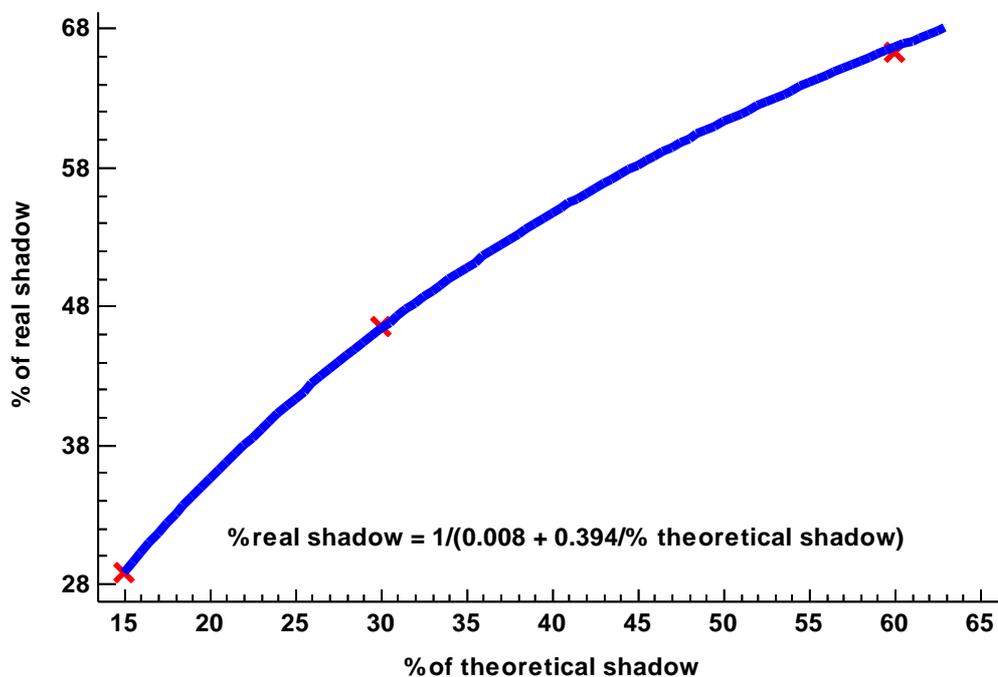


Figura 57. Reducción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) que producen las superficies de sombra del 15%, 30% y 50% con respecto a la radiación del control (0%). En la figura se representa el promedio del periodo de octubre a mayo.

La variación de temperatura media mensual entre los tratamientos de sombra se muestra en la Figura 58. Los resultados muestran que la mayor temperatura media mensual alcanzada en el interior del invernadero se produjo en el tratamiento control en todos los meses estudiados, excepto en enero, en donde la mayor temperatura se produjo en el 50%. La mayor temperatura en todo el periodo se alcanzó en mayo en el control con 34,5 °C.

Las temperaturas más bajas en el interior del invernadero se produjeron justo antes de la salida del sol. Entre los tratamientos estudiados, la menor temperatura se alcanzó en el 50% en todos los meses, excepto en febrero que fue en el control y 30%. La menor temperatura en todo el periodo estudiado se produjo en febrero en el control y el 30 % con 9,2 °C.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

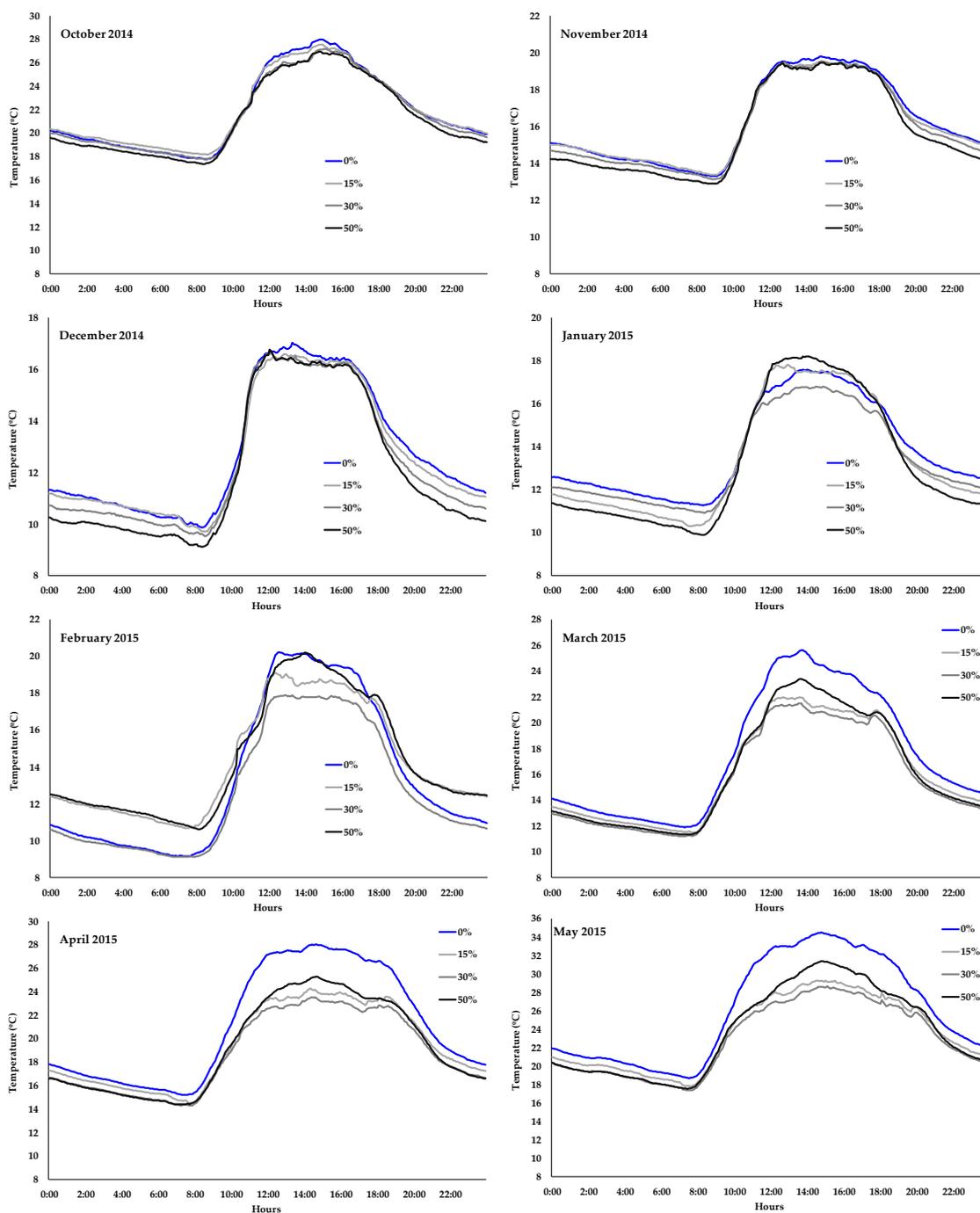


Figura 58. Evolución diaria media mensual de la temperatura producida por los tratamientos de sombreado (0% 15%, 30% y 50%) para el periodo de estudio.

4.2. Conductividad eléctrica y pH de la solución del suelo

El pH y la conductividad eléctrica (CE) de la solución del sustrato de cultivo fueron estadísticamente superiores en el control y 15% de sombra que en el resto de tratamientos con mayor sombreado (Figura 59). En el análisis del promedio del periodo de estudio, el mayor pH y CE se produjo en el testigo sin sombreado exterior con 6.28 de pH y 3.09 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ respectivamente. El tratamiento del 15% mostró resultados similares al control (6.25 de pH y 3.07 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$). Los tratamientos con mayor superficie de sombreado exterior (30% y 50%) mostraron resultados similares, siendo el 50% de sombra el que obtuvo el pH y CE más bajos (6.01 de pH y 2.81 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$). La evolución temporal del pH y la CE de la solución del sustrato de cultivo fue similar para todos los tratamientos estudiados (Figura 59). La CE mostró un leve aumento a lo largo del ciclo de cultivo, en cambio, el pH, tras un aumento al inicio (37 d.a.t.), mostró un descenso progresivo hasta la finalización del cultivo.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

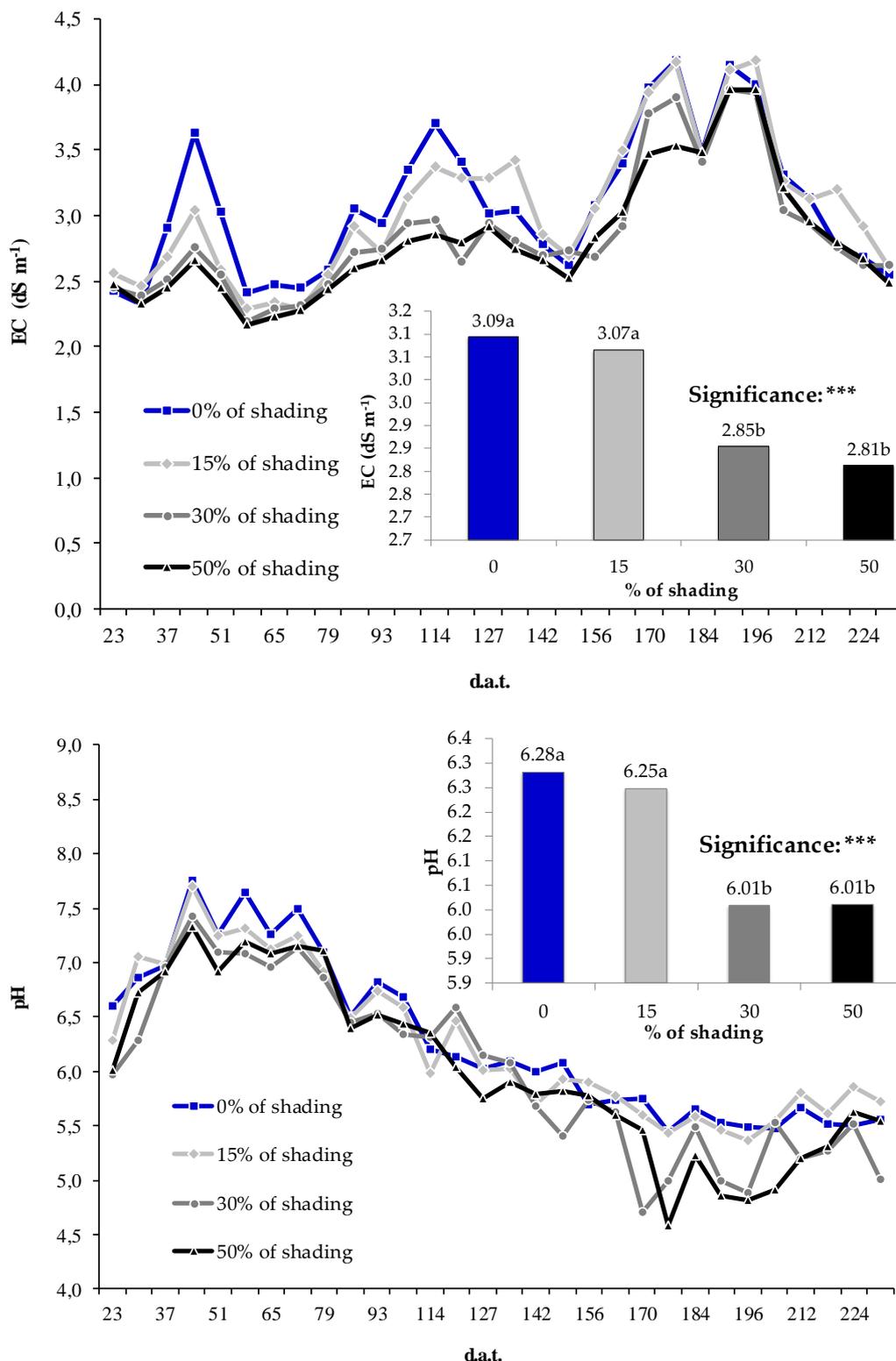


Figura 59. Evolución temporal y promedio del periodo del pH y la conductividad eléctrica (CE) de la solución del sustrato de cultivo (dS · m⁻¹). En el promedio del periodo se realiza el análisis de la varianza según el modelo $Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$. La nomenclatura n.s., *, **, * indica no significativo o significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente. Valores numéricos para cada columna seguidos de distinta letra denotan significación estadística para $P < 0.05$ según el test de mínimas diferencias significativas (LSD) corregido.**

4.3. Efecto del sombreado sobre el rendimiento del cultivo

Los niveles de sombreado que producirían módulos fotovoltaicos ubicados en el exterior del techo de invernadero afectaron de forma significativa al rendimiento del cultivo. Tanto la producción total (Tabla 5) como la producción comercial acumulada (Figura 60) fueron significativamente superiores en el testigo (0% sombra) que en los tratamientos sombreados (15%, 30% y 50%) en todo el periodo estudiado. En cuanto a los niveles de sombra, el rendimiento total y comercial en el tratamiento del 15% fue significativamente superior que en 30% y 50% de sombra (excepto en la producción comercial a 141 d.a.t.). Entre los tratamientos del 30% y 50% solo hubo diferencias a 131 y 239 d.a.t. en la producción total y a 131 y 161 d.a.t. en la producción comercial. Además, el nivel de sombra fue inversamente proporcional al rendimiento, es decir, el incremento de sombra produjo una reducción lineal del rendimiento, tal y como se muestra en la Figura 61.

% Sombra	Days after transplant							
	113	131	141	161	181	209	222	239
0%	1.02a	3.5a	5.3a	8.5a	12.9a	15.7a	17.3a	18.8a
15%	0.60b	2.1b	3.2b	5.5b	9.4b	11.9b	14.1b	16.9b
30%	0.19c	1.4c	2.3c	4.1c	7.4c	9.1c	10.5c	13.4c
50%	0.01c	0.7d	1.5c	3.3c	6.3c	7.8c	9.0c	11.5d
Significación	***	***	***	***	***	***	***	***

*Análisis de la varianza según el modelo $Y_{ij}=\mu+\alpha_i+\beta_j+\varepsilon_{ij}$. La nomenclatura n.s., *, **, *** indica no significativo o significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 , respectivamente. Valores numéricos para cada columna seguidos de distinta letra denotan significación estadística para $P<0.05$ según el test de mínimas diferencias significativas (LSD) corregido.*

Tabla 5. Efecto del sombreado sobre el rendimiento total acumulado ($kg \cdot m^2$) de tomate.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

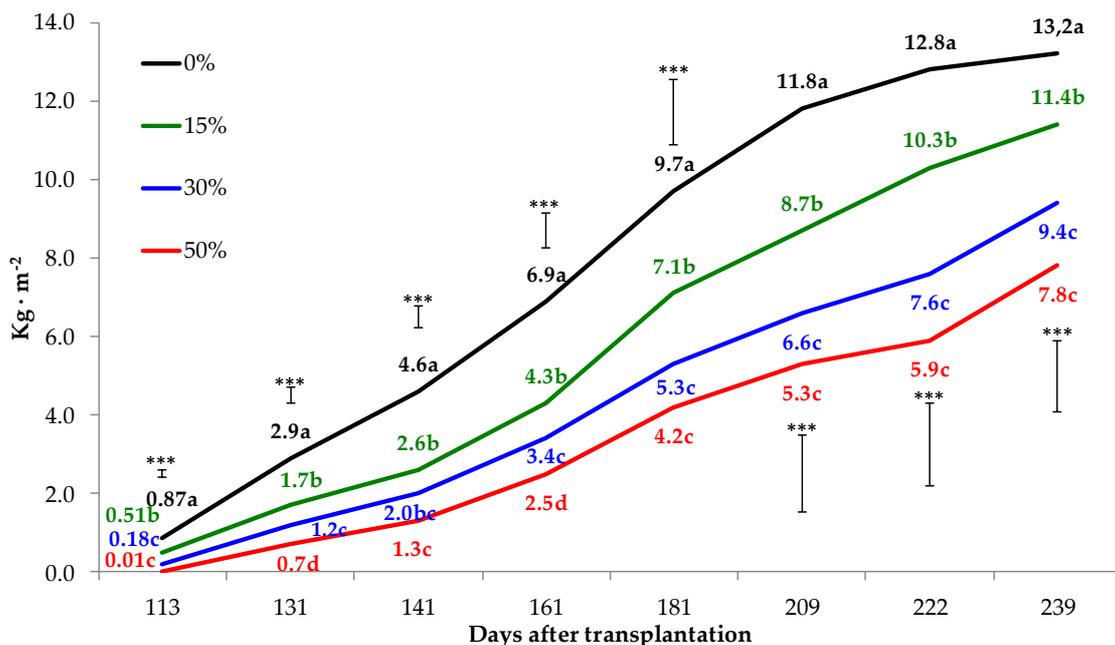


Figura 60. Efecto del sombreado sobre la evolución temporal del rendimiento comercial acumulado ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$). Los resultados provienen del análisis de la varianza según el modelo $Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$. Valores numéricos asociados a cada d.a.t. seguidos de distinta letra denotan significación estadística para $P < 0.05$ según el test de mínimas diferencias significativas (LSD) corregido. Las barras de error se corresponden con los valores de mínimas diferencias significativas según el test LSD corregido. La nomenclatura n.s., *, **, * indica no significativo o significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 , respectivamente.**

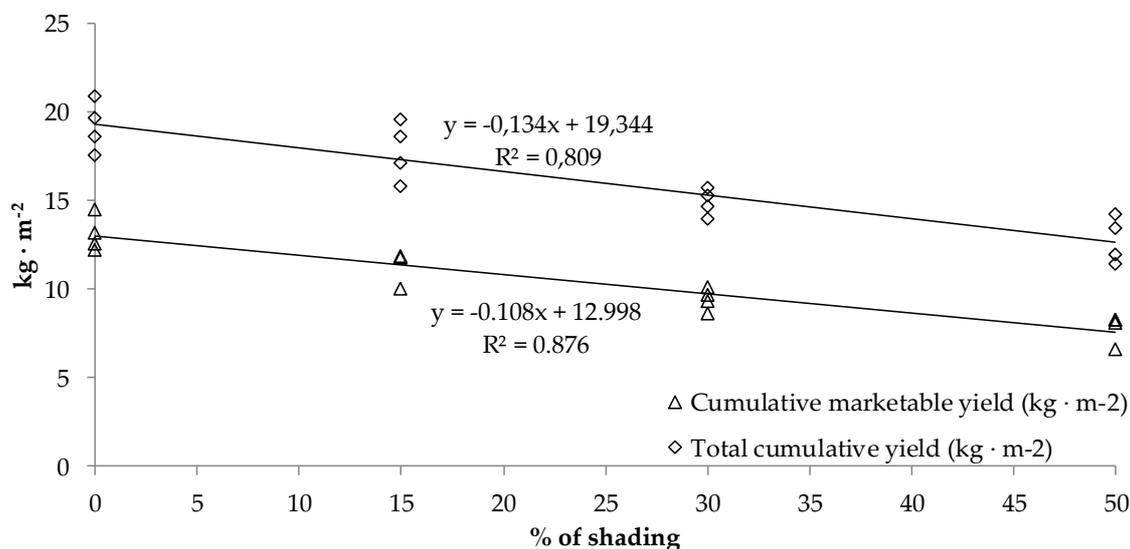


Figura 61. Relación entre el incremento del sombreado y el rendimiento total y comercial acumulado ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) al final del ciclo de cultivo.

El sombreado estudiado también redujo la precocidad de la producción a 113 y 131 d.a.t.. El testigo arrojó una producción precoz significativamente mayor que los niveles de sombra (Tabla 5 y Figura 60). En la primera recolección (113 d.a.t.) un 15% de sombra redujo el rendimiento total un 41% y un 43% el rendimiento comercial. Con un 30% de sombra, el rendimiento total y comercial se redujo con respecto al testigo en un 81% y 60% respectivamente. Con el 50% de sombra, prácticamente no hubo producción.

Finalmente, el sombreado produjo retraso en la producción al final del ciclo de cultivo (239 d.a.t.). A 174 d.a.t. se eliminó el brote principal para evitar que la planta siguiese creciendo longitudinalmente y así favorecer el desarrollo de los frutos en los últimos ramos. En los tratamientos de sombreado se produjo mayor producción de frutos verdes en la última recolección (Figura 62). La ausencia de sombra (0%) mostró de forma significativa la menor producción de frutos verdes ($0.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) frente a los tratamientos de sombreado 15%, 30% y 50%, donde se produjo 0.91, 1.52 y $1.32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ respectivamente. Además, en el caso del 0% y el 15% de sombra, prácticamente todos los frutos fueron comercializados tras su maduración en cámara. En cambio, con 30% y 50% de sombra, los frutos verdes no comercializables aumentaron de forma significativa a 0.36 y $0.40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ respectivamente.

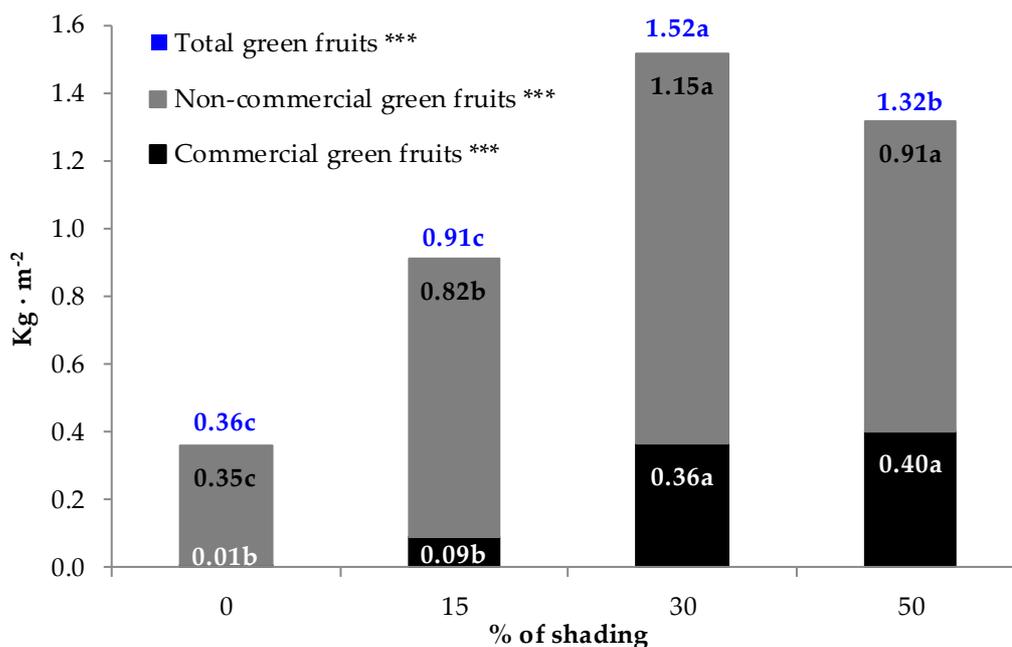


Figura 62. Efecto del sombreado sobre la producción ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) de frutos verdes (total, comercial y no comercial) recolectados en la última recolección (239 d.a.t.). Los resultados provienen del análisis de la varianza según el modelo $Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$. Valores numéricos asociados a la producción total, comercial y no comercial, seguidos de distinta letra denotan significación estadística para $P < 0.05$ según el test de mínimas diferencias significativas (LSD) corregido. La nomenclatura n.s., *, **, * indica no significativo o significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 , respectivamente.**

El sombreado excesivo producido por el 50% de sombra redujo de forma significativa el número de frutos producidos por las plantas con respecto al control (0%) y al 15% de sombra. El número de frutos comercializables no mostró diferencias significativas entre

el control (0%), 15% y 30%. No obstante, se observa una reducción del número de frutos asociado al aumento del nivel de sombra. El mayor número de frutos comercializables se produjo en el control con 128 frutos · m⁻², seguido del 15% de sombra (119 frutos · m⁻²), en el 30% se obtuvo menos, con 103 frutos · m⁻². En el 50% de sombreado, con 86 frutos · m⁻², se obtuvo el menor número de frutos, aunque sin diferencias significativas con respecto al 15% y 30% de sombra (Figura 63).

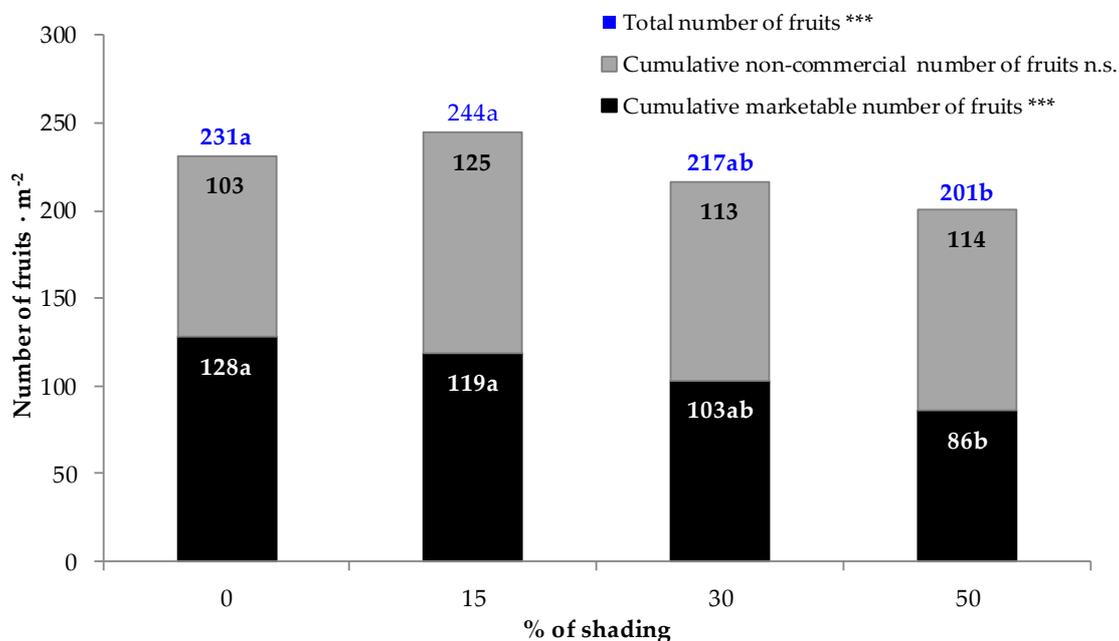


Figura 63. Efecto del sombreado sobre el número de frutos (total, comercial y no comercial) por m⁻² recolectados en la última recolección (239 d.a.t.). Los resultados provienen del análisis de la varianza según el modelo $Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$. Valores numéricos asociados al número de frutos total, comercial y no comercial, seguidos de distinta letra denotan significación estadística para $P < 0.05$ según el test de mínimas diferencias significativas (LSD) corregido. La nomenclatura n.s., *, **, *** indica no significativo o significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

4.4. Efecto del sombreado sobre la calidad de fruto

De los parámetros de calidad de fruto evaluados sólo se produjeron diferencias significativas en la firmeza, los SST, y el Croma del fruto (Tabla 6.). En el peso del fruto se muestra un descenso de su valor cuando aumentamos el nivel de sombra, aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Los mayores valores de SST se produjeron en 0% y 15 % con 4.49 y 4.60 °Brix respectivamente, además, estos tratamientos de sombra mostraron diferencias significativas con el 30% y el 50% de sombra; y cuyos valores fueron 4.43 y 4.40 °Brix. En el caso de pH del fruto, los valores fueron muy similares entre los tratamientos de sombra estudiados. En el caso de la firmeza, esta aumenta significativamente cuando aumentamos el nivel de sombra. La firmeza del fruto fue significativamente menor en el control (4.3 N), que en 30% y 50% de sombreado, los cuales mostraron una firmeza de 4.7 y 4.8 N.

	PMF (g)	Croma	Firmeza (N)	SST (°Brix)	pH
% Sombra					
0%	101.6	30.15a	4.3c	4.49a	4.40
15%	97.0	27.92b	4.5bc	4.60a	4.38
30%	95.6	27.43c	4.7ab	4.43b	4.40
50%	94.9	27.40c	4.8a	4.40b	4.45
Significación	n.s.	***	***	***	n.s.

PMF: Peso Medio del Fruto. SST: Sólidos Solubles Totales. Análisis de la varianza según el modelo $Y_{ij}=\mu+\alpha_i+\beta_j+\varepsilon_{ij}$. La nomenclatura n.s., *, **, *** indica no significativo o significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente. Valores numéricos para cada columna seguidos de distinta letra denotan significación estadística para $P < 0.05$ según el test de mínimas diferencias significativas (LSD) corregido.

Tabla 6. Efecto del sombreado sobre la calidad de fruto.

El color del fruto mostró diferencias significativas entre los tratamientos de sombreado La intensidad del color del fruto, representada por el croma, aumenta de forma cuando se recude el % de sombra (Tabla 6). El tratamiento control mostró la mayor intensidad de color, con un croma de 30.15, además esta afirmación se puede corroborar con los mayores valores de a^* y b^* (Figura 64).

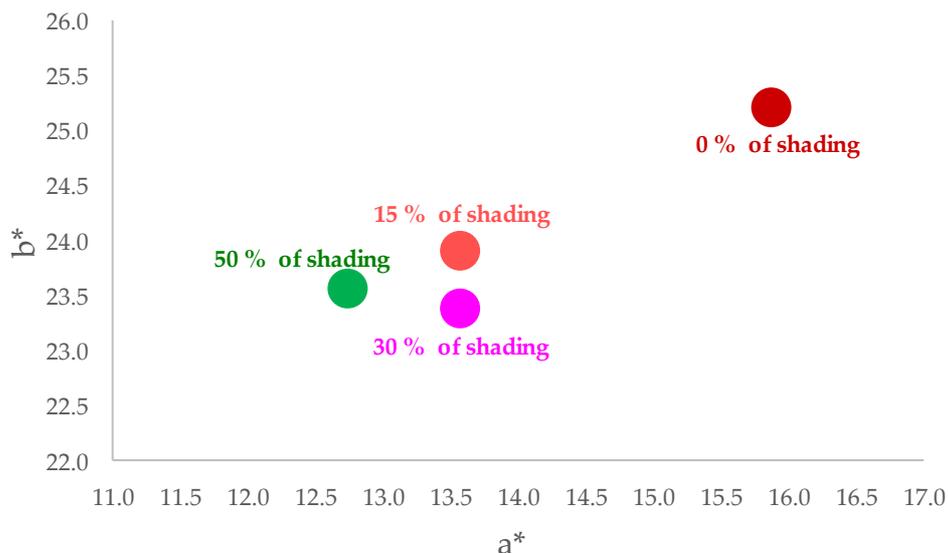


Figura 64. Efecto del sombreado sobre el color del fruto.

4.5. Viabilidad económica de los invernaderos fotovoltaicos en la provincia de Almería

A. Instalación de placas fotovoltaicas ajustada al consumo energético de la explotación agrícola: régimen de autoconsumo con excedentes acogido a compensación.

El estudio económico y de rentabilidad plantea encontrar la viabilidad de la inversión en placas fotovoltaicas asociadas al autoconsumo con compensación de excedentes en explotaciones de invernadero en la provincia de Almería (potencia pico instalada inferior a 100 kWp). La premisa de diseño de la hipótesis es que la instalación fotovoltaica se ajusta al consumo energético medio del invernadero tipo en Almería.

- **Superficie del invernadero**, se considera una superficie de invernadero de 1 ha.
- **Consumo energético del invernadero**. Para el cálculo del consumo energético del invernadero se ha realizado una estimación con los valores proporcionados por el Observatorio de Precios de Mercado de la Junta de Andalucía para la campaña 18/19 de tomate en gasto energético medio por hectárea y las tarifas proporcionados por Endesa como distribuidora de referencia (tarifa One Luz), considerando una potencia contratada de 10 kW.

Gasto medio energético de la explotación: 2.290 €

Tarifa One Luz Endesa para potencias <10 kW

- *Término Potencia (sin impuestos) - 3,429702 €/kW*
- *Término Energía (sin impuestos) - 0,119893 €/kWh*

Con los datos proporcionados, obtenemos un consumo energético medio estimado de **15.678 kWh** durante el ciclo de cultivo. Consideramos para el cálculo de la superficie fotovoltaica un consumo de **16.000 kWh**.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

- **Superficie fotovoltaica a instalar.** Para el cálculo de la instalación fotovoltaica necesaria se ha utilizado la herramienta oficial PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) de la Comisión Europea, disponible en la página web: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#PVP.

Se han utilizado como datos de localización geográfica las coordenadas UTM del Centro Experimental TECNOVA.

Para un consumo anual estimado de 16.000 kWh, y una media mensual de 1.333,33 kWh, calculamos la instalación fotovoltaica para que cubra las necesidades mensuales del invernadero considerando el mes más desfavorable para la producción fotovoltaica. Con estos datos, calculamos una instalación de 30 placas fotovoltaicas (0,6 % de superficie sombreada), las cuales supondrían una potencia pico instalada de 12 kWp.

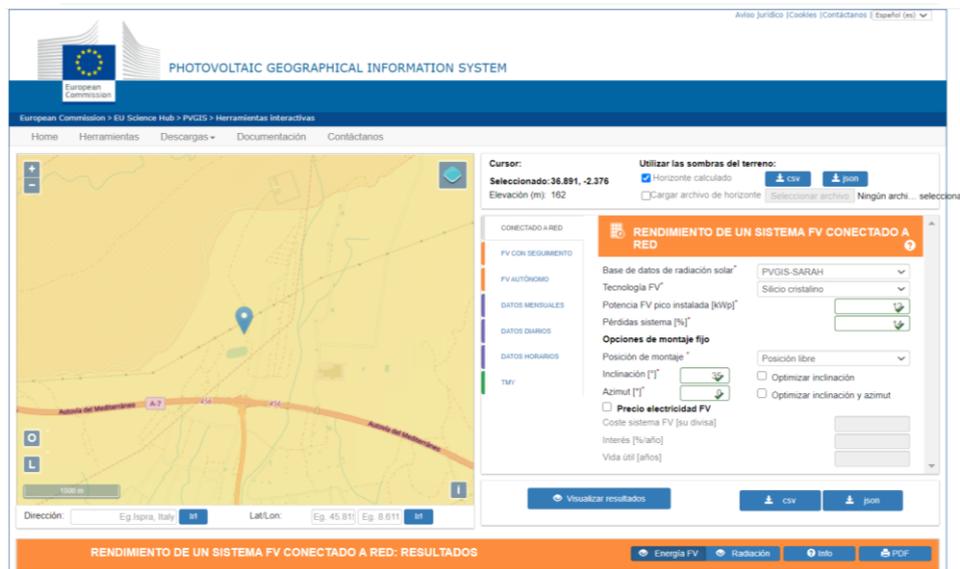


Figura 65. Aplicación PVGIS para el cálculo de instalaciones fotovoltaicas.

Se ha considerado, que, durante la instalación de las placas, se proporciona un ángulo óptimo para la producción fotovoltaica, mediante estructuras portantes para obtener una inclinación optimizada para nuestra latitud (35°) y unas pérdidas del sistema del 14%. Con los datos aportados, obtenemos una producción anual fotovoltaica de 20.943,65 kWh, con valores mensuales mínimos de 1.380,31 kWh producidos en el mes de noviembre, y máximos de 2.043,29 kWh en el mes de Julio (Figura 66).

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”



Figura 66. Resultados de la simulación para 12,0 kWp

Considerando el consumo anual de 16.000 kWh, dado para un invernadero de baja tecnología, donde los principales consumos vienen del sistema de fertirrigación y de los motores de la ventilación cenital, podemos aproximar un consumo estable mensual, considerando que no existen elementos de climatización como calefacciones o refrigeraciones, que serían dependientes de las condiciones meteorológicas. Así, podemos considerar que el consumo medio mensual del invernadero se situaría en torno a 1.333,33 kWh, por lo que, en términos absolutos, considerando el 100% de la energía fotovoltaica generada, el sistema fotovoltaico planteado cubriría plenamente las necesidades energéticas del invernadero (Figura 67), representadas por la línea roja.

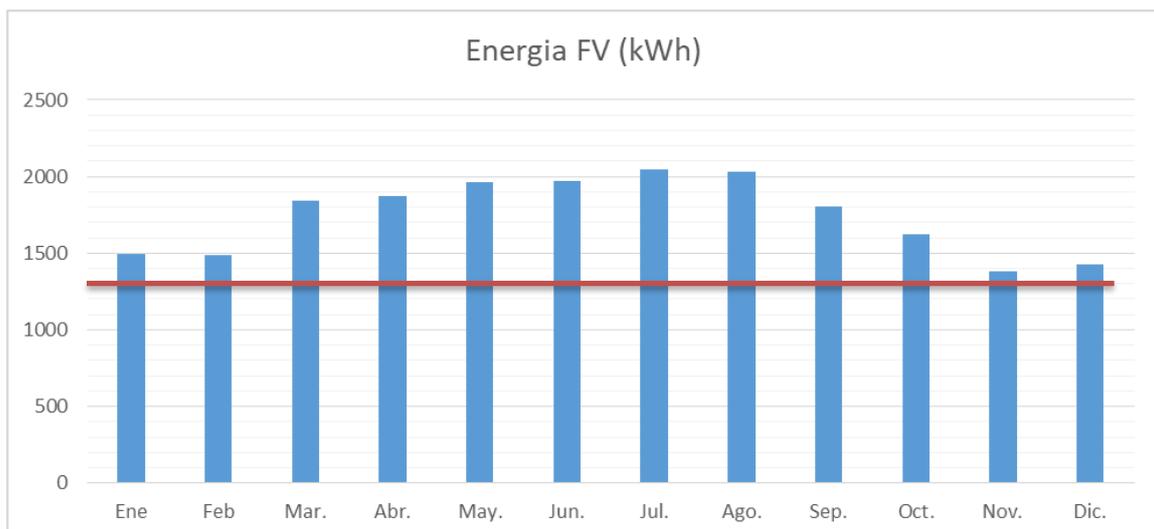


Figura 67. Producción Energética vs. Consumo del invernadero

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Mes	Energía FV (kWh)	Consumo (kWh)	Excedente /Deficit Energético Bruto	Energía FV autoconsumo (60%)	Déficit Energético (kWh)	kWh Compensación de excedentes disponibles	kWh compensados
Ene	1497,37	1333,33	164,04	898,42	434,91	598,95	434,91
Feb	1490,77	1333,33	157,44	894,46	438,87	596,31	438,87
Mar.	1845,05	1333,33	511,72	1107,03	226,30	738,02	226,30
Abr.	1869,22	1333,33	535,89	1121,53	211,80	747,69	211,80
May.	1961,31	1333,33	627,98	1176,79	156,54	784,52	156,54
Jun.	1973,62	1333,33	640,29	1184,17	149,16	789,45	149,16
Jul.	2043,29	1333,33	709,96	1225,97	107,36	817,32	107,36
Ago.	2028,24	1333,33	694,91	1216,94	116,39	811,30	116,39
Sep.	1800,80	1333,33	467,47	1080,48	252,85	720,32	252,85
Oct.	1625,33	1333,33	292,00	975,20	358,13	650,13	358,13
Nov.	1380,31	1333,33	46,98	828,19	505,14	552,12	505,14
Dic.	1428,35	1333,33	95,02	857,01	476,32	571,34	476,32

Tabla 7. Producción fotovoltaica y compensación de excedentes hipótesis inicial

Con los datos arrojados por la aplicación PVGIS, y considerando un 60% de aprovechamiento de Energía en autoconsumo, se han calculado (Tabla 7), el déficit Energético que tendría el sistema y los kWh que serían consumidos en la modalidad de compensación de excedentes, al PVPC.

Teniendo en cuenta el consumo anual estimado del invernadero en 16.000 kWh, se ha distribuido el mismo en los doce meses del año, estimando por tanto un consumo mensual medio de 1.333,33 kWh. Aplicando los datos de las diferentes tarifas y consumos de luz, podemos estimar las diferencias o ahorro que supondría para el agricultor, en su factura de la luz, la inversión en paneles fotovoltaicos, y con ello calcular la rentabilidad de la inversión.

Mes	Término potencia	Término Energía	Descuento por kWh compensados	Total estimado factura (sin impuestos)
Ene	40,39 €	60,89 €	-20,44 €	80,84 €
Feb	40,39 €	61,44 €	-20,63 €	81,20 €
Mar.	40,39 €	31,68 €	-10,64 €	61,44 €
Abr.	40,39 €	29,65 €	-9,95 €	60,09 €
May.	40,39 €	21,92 €	-7,36 €	54,95 €
Jun.	40,39 €	20,88 €	-7,01 €	54,26 €
Jul.	40,39 €	15,03 €	-5,05 €	50,37 €
Ago.	40,39 €	16,29 €	-5,47 €	51,21 €
Sep.	40,39 €	35,40 €	-11,88 €	63,91 €
Oct.	40,39 €	50,14 €	-16,83 €	73,70 €
Nov.	40,39 €	70,72 €	-23,74 €	87,37 €
Dic.	40,39 €	66,68 €	-22,39 €	84,69 €
				804,02 €

Tabla 8. Datos estimados del gasto energético de la finca con paneles solares fotovoltaicos instalados.

Con los datos ofrecidos, podemos simular el coste mensual de la factura energética (Tabla 8) , observando un gasto acumulado anual de 804,02 €, que **supondría un ahorro de 1.485,98 € anuales respecto al gasto de referencia (2.290 €).**

Considerando el precio de referencia para la instalación, de 1,5 €/Wp, la inversión para el sistema fotovoltaico calculado sería de **18.000 €**. El importe anual de 1.485,98 € de ahorro, respecto al coste de referencia los consideramos como el resultado de los flujos de caja anuales de la inversión, para poder calcular la rentabilidad de la misma en un periodo de 25 años de vida útil de la misma y una TNA del 4,77%.

VAN: 3.278,37 €

TIR: 6,6 %

Como vemos la inversión se consideraría rentable para los valores establecidos, recuperando la inversión en el año 13.

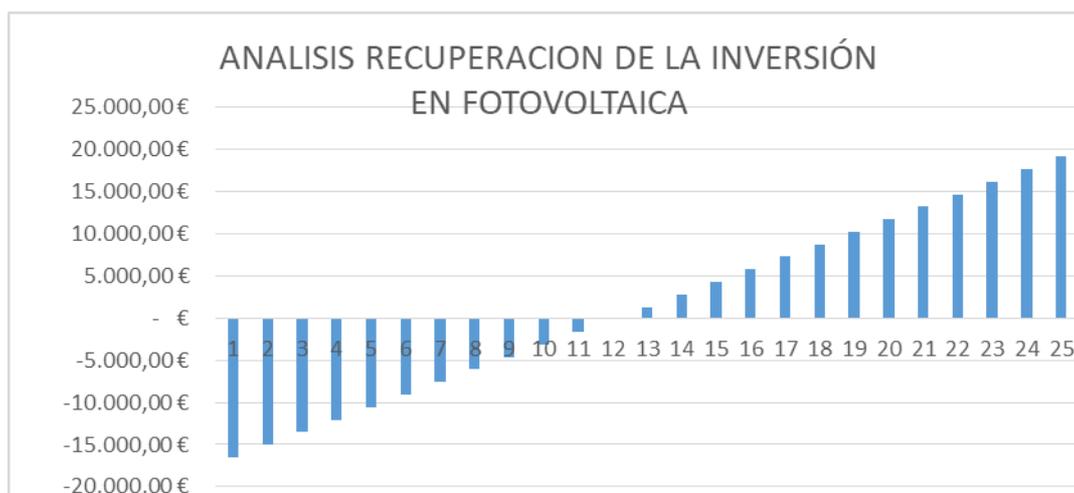


Figura 68. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario inicial

Una vez analizado el caso inicial, podemos analizar cuál es el impacto de modificar varias de las consideraciones de esta primera hipótesis. Para ello se han considerado las siguientes casuísticas:

- **Variable 1: Angulo de inclinación de las placas.** En el supuesto inicial hemos considerado una inclinación óptima de las placas solares (35° para nuestra latitud). Esta inclinación, no obstante, dista mucho de la pendiente de cubierta de un invernadero de Raspa y Amagado de la provincia de Almería, que se sitúa en valores alrededor de 13° en el caso de capillas intermedias y 18° en el caso de las capillas de banda. Se ha analizado el impacto sobre la rentabilidad de respetar la pendiente de la cubierta de un invernadero en Almería, considerando, que se realiza la instalación en la banda lateral (18°).
- **Variable 2: % de autoconsumo.** En el supuesto inicial, se ha considerado que un 60% de la Energía generada por las placas fotovoltaicas es consumida directamente por las necesidades energéticas del invernadero (gratuita y libre de impuestos), siendo el resto de Energía, volcada a red y posteriormente recuperada por el agricultor al precio de referencia establecido por la comercializadora, en base al PVPC (precio de referencia 0,047 €/kwh). Se ha analizado el impacto de considerar un % de autoconsumo del 100%.
- **Variable 3: Obtención de subvenciones a la modernización de explotaciones de Andalucía (PDR-A 2014-2020).** En el supuesto inicial, se ha considerado que la inversión en placas fotovoltaicas, es asumida por el agricultor con fondos propios. Sin embargo, existen opciones para la financiación de este tipo de inversiones con subvenciones públicas a fondo perdido. Concretamente las inversiones en instalaciones fotovoltaicas en explotaciones agrícolas se encuentran recogidas dentro del marco de la submedida 4,1 del Programa de Desarrollo Rural de Andalucía 2014-2020, cuya convocatoria para la anualidad 2020 fueron publicadas en el BOJA 213 de 4 de Noviembre de 2020. El gasto máximo por inversión subvencionable en función de cada operación vendrá

determinado por los costes de referencia que se relacionan en el Anexo V de esta orden, que para módulos fotovoltaicos fijos establece como límite 1 €/Wp.

- Variante 4: Disminución del precio de instalación del Wp. Para el escenario inicial se ha considerado los datos aportados por (Donoso, 2018), para sistemas fotovoltaicos de 5-10 kWp, conectados a red (1,5 €/ Wp). No obstante, estos datos según precios de referencia de mercado actuales son elevados, situándose las instalaciones en torno a 1 €/Wp. Contemplamos este supuesto para obtener una aproximación más realista de la rentabilidad para el agricultor medio almeriense.

Si comparamos los resultados obtenidos entre la hipótesis inicial (*Figura 68*) y los escenarios con las variables de inclinación de la cubierta, % de autoconsumo y ayudas a la inversión, podemos observar:

- El ángulo de instalación de las placas fotovoltaicas hace que en aquellos meses con mayor déficit de producción energética, este sea más acentuado, y haya una mayor producción en los meses de verano, Aunque el impacto en el balance energético global no es muy significativo, sí que lo es en el balance mensual. En el supuesto estudiado el consumo estimado de luz ascendería a 863,36 € (+102,05 € con respecto al supuesto inicial) (Tabla 9), por lo que el VAN y el TIR obtendrían valores de 2.461,41 € y 6,1 % respectivamente, manteniéndose el periodo de recuperación de la inversión, el cual se produciría en la 13 anualidad (*Figura 69*).
- El % de autoconsumo. Si consideramos un 100% de la Energía generada aprovechada en autoconsumo, el consumo estimado anual de luz descendería hasta los 484,68 €, con un ahorro anual de 1.805,32 € con respecto al precio de referencia (Tabla 10). Esto incrementaría la rentabilidad de la inversión, obteniendo valores del VAN de 7.675,02 € y TIR de 8,8%, pasando el periodo de recuperación de la inversión al año 10 (*Figura 70*).
- La obtención de subvenciones a la modernización de explotaciones de Andalucía (PDR-A 2014-2020), supone un importante incentivo para la realización de inversiones por parte del agricultor. considerando que la subvención se recibiría en la cuenta de explotación en el año 2, esto cambiaría el marco de rentabilidad de la inversión significativamente, obteniéndose valores del VAN 13.712,84 € y TIR del 16%, con un periodo de recuperación de la inversión obtenido en el año 5 (*Figura 71*). Para este supuesto se consideran los mismos datos de producción fotovoltaica y consumos estimados que en el supuesto 1 (Tabla 7 y Tabla 8).
- La disminución del precio de instalación del Wp. obtiene un impacto directo sobre la rentabilidad de la operación, alcanzado valores de VAN de 9.005,20 € y TIR del 11,6%, alcanzándose el periodo de recuperación de la inversión en el año 9 (*Figura 72*). Si sobre este supuesto, contemplamos la subvención del PDR-Andalucía, la inversión se recuperaría en el 2º año, con un VAN de 19.439,67 € y TIR de 30,2%.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Mes	Energía FV (kWh)	Consumo (kWh)	Energía FV autoconsumo	Deficit Energético (kWh)	kWh Compensación de excedentes	Excedente/Déficit Energético Bruto	kWh compensados	Término potencia	Término Energía	Descuento por kWh compensados	Total estimado factura (sin impuestos)
Ene	1238,63	1333,33	743,18	590,15	495,45	-94,70	495,45	40,39 €	82,62 €	-23,29 €	99,73 €
Feb	1309,02	1333,33	785,41	547,92	523,61	-24,31	523,61	40,39 €	76,71 €	-24,61 €	92,49 €
Mar.	1740,85	1333,33	1044,51	288,82	696,34	407,52	288,82	40,39 €	40,43 €	-13,57 €	67,25 €
Abr.	1887,39	1333,33	1132,43	200,90	754,96	554,06	200,90	40,39 €	28,13 €	-9,44 €	59,07 €
May.	2086,82	1333,33	1252,09	81,24	834,73	753,49	81,24	40,39 €	11,37 €	-3,82 €	47,95 €
Jun.	2161,18	1333,33	1296,71	36,62	864,47	827,85	36,62	40,39 €	5,13 €	-1,72 €	43,80 €
Jul.	2208,05	1333,33	1324,83	8,50	883,22	874,72	8,50	40,39 €	1,19 €	-0,40 €	41,18 €
Ago.	2090,55	1333,33	1254,33	79,00	836,22	757,22	79,00	40,39 €	11,06 €	-3,71 €	47,74 €
Sep.	1743,58	1333,33	1046,15	287,18	697,43	410,25	287,18	40,39 €	40,21 €	-13,50 €	67,10 €
Oct.	1471,71	1333,33	883,03	450,30	588,68	138,38	450,30	40,39 €	63,04 €	-21,16 €	82,27 €
Nov.	1169,45	1333,33	701,67	631,66	467,78	-163,88	467,78	40,39 €	88,43 €	-21,99 €	106,84 €
Dic.	1158,53	1333,33	695,12	638,21	463,41	-174,80	463,41	40,39 €	89,35 €	-21,78 €	107,96 €
											863,36 €

Tabla 9. Resultados de la simulación para inclinación de las placas fotovoltaicas según ángulo de cubierta

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Mes	Energía FV (kWh)	Consumo (kWh)	Energía FV autoconsumo	Deficit Energético (kWh)	Excedente/Deficit Energético Bruto	kwh compensados	Término potencia	Término Energía	Descuento por kWh compensados	Total estimado factura (sin impuestos)
Ene	1497,37	1333,33	164,04	0,00	164,04	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Feb	1490,77	1333,33	157,44	0,00	157,44	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Mar.	1845,05	1333,33	511,72	0,00	511,72	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Abr.	1869,22	1333,33	535,89	0,00	535,89	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
May.	1961,31	1333,33	627,98	0,00	627,98	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Jun.	1973,62	1333,33	640,29	0,00	640,29	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Jul.	2043,29	1333,33	709,96	0,00	709,96	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Ago.	2028,24	1333,33	694,91	0,00	694,91	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Sep.	1800,80	1333,33	467,47	0,00	467,47	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Oct.	1625,33	1333,33	292,00	0,00	292,00	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Nov.	1380,31	1333,33	46,98	0,00	46,98	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
Dic.	1428,35	1333,33	95,02	0,00	95,02	0,00	40,39 €	- €	- €	40,39 €
										484,68 €

Tabla 10. Resultados de la simulación para % de autoconsumo del 100%

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

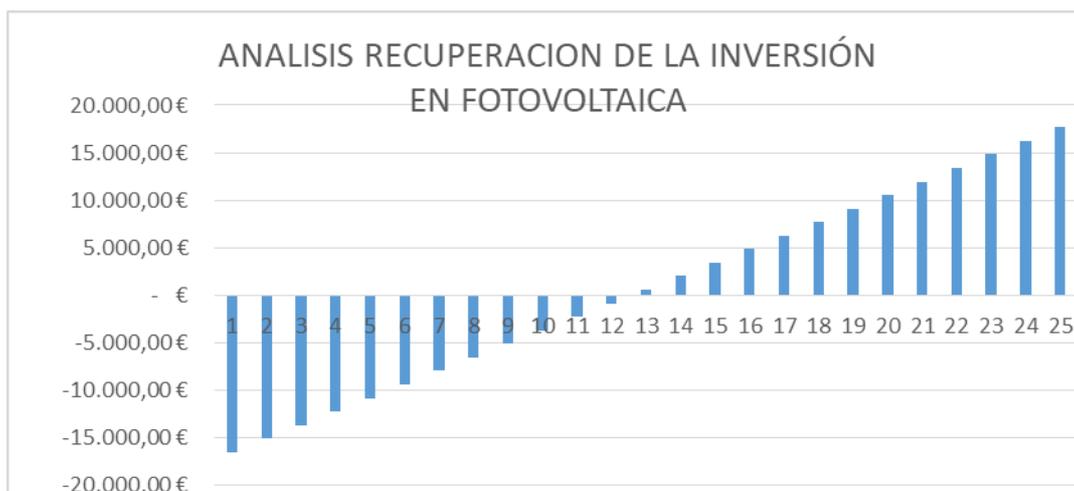


Figura 69. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario de placas según ángulo de cubierta

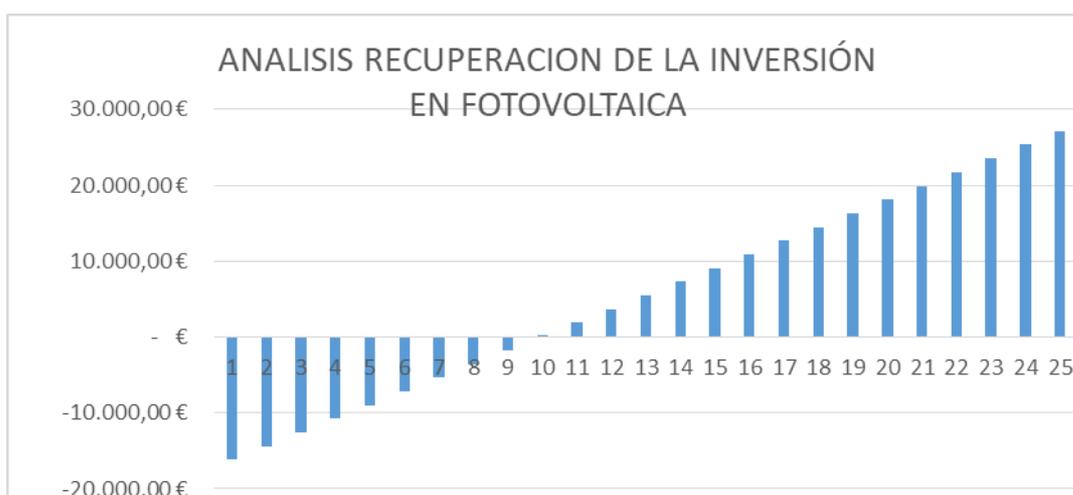


Figura 70. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario de autoconsumo 100%

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”



Figura 71. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario considerando la obtención de subvenciones.

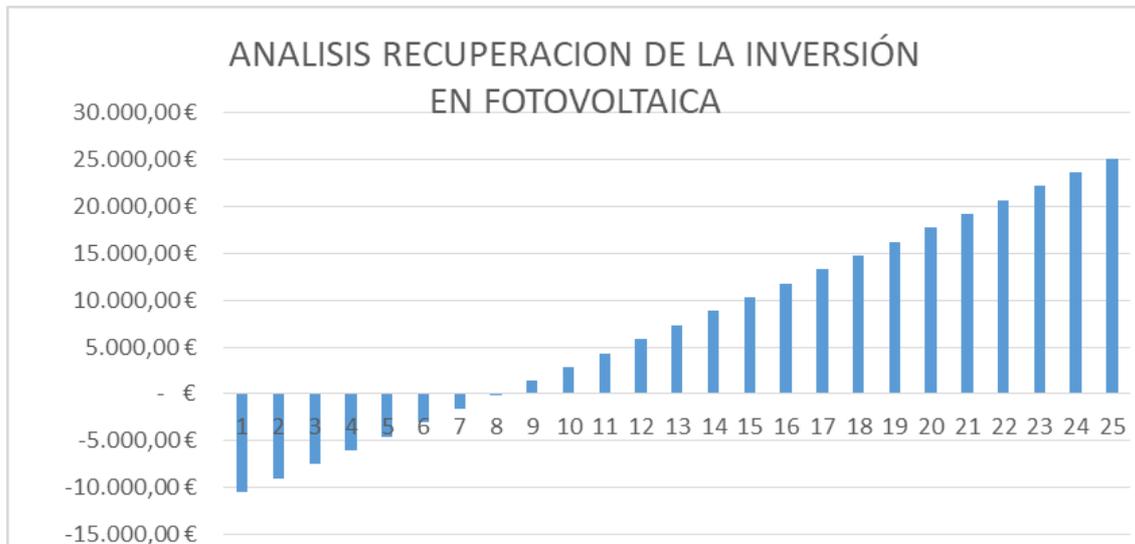


Figura 72. Análisis de recuperación de la inversión fotovoltaica en el escenario considerando una disminución del Wp instalado.

B. Instalación de placas fotovoltaicas en invernadero orientado a la venta de energía, con potencias superiores a 100 kWp

En esta segunda hipótesis realizada, se ha considerado que el agricultor realiza una instalación de grandes dimensiones, por encima de los 100 kWp, orientada a la venta de energía a la red.

En el caso de una instalación para un invernadero de 1 ha, la potencia pico instalada sería superior a 100 kWh, por lo que los precios de referencia y las normativas difieren con respecto a los valores planteados en la metodología de la primera hipótesis. En la metodología utilizada para el análisis de la inversión de esta segunda hipótesis, se han considerado los supuestos y valores utilizados para el cálculo de las diferentes alternativas.

- **Superficie del invernadero**, se considera una superficie de invernadero de 1 ha, como el considerado en la primera hipótesis.
- **Consumo energético del invernadero**, se han considerado los valores utilizados en la primera hipótesis. Consideramos, por tanto, un consumo energético anual de **16.000 kWh**.
Consideramos el gasto medio igual que en el primer escenario: Gasto medio energético de la explotación: 2.290 € anuales, de los cuales 484,68 €, impuestos incluidos, corresponden al término de potencia contratada.
- **Alternativas de sombreado consideradas**. Para el cálculo de la instalación fotovoltaica necesaria se ha utilizado la herramienta oficial PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) de la Comisión Europea, disponible en la página web: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#PVP.
Se han utilizado como datos de localización geográfica las coordenadas UTM del Centro Experimental TECNOVA.

Alternativa	% sombreado	Potencia pico instalada kWp	Producción anual FV Kwh	Valor de la inversión (€)
1	10%	200	349.062,97	180.000,00 €
2	15%	300	523.594,45	270.000,00 €
3	30%	600	1.047.188,91	540.000,00 €
4	50%	1.000	1.745.314,85	900.000,00 €

Tabla 11. Potencia pico instalada y producción anual fotovoltaica en las diferentes alternativas de sombreado.

- **Precio medio del kWp instalado**: Se consideran los datos aportados por (Donoso, 2018), para sistemas fotovoltaicos de mayores de 100 kW y por debajo de 1 MW conectados a red, considerado el valor de 0,75 €/Wp.
- Consideramos la instalación **dentro del “RD 1995/2000 de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización,**

suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica”.

- En este caso, el **precio de venta de la energía**, estaría regulado dentro del mercado de electricidad, gestionado por el operador del mercado OMIE, que gestiona el mercado diario y el mercado intradiario de la energía. Según el Informe Integrado OMI 2019 el precio medio diario del mercado diario de la energía se situó en 2019 en **47,68 €/MWh** en España.
- Consideramos en este caso también, la pérdida de ingresos de la actividad agrícola como consecuencia del sombreado fotovoltaico. Introducimos este dato como un valor negativo en el flujo de caja de nuestra inversión.

Con los datos expuestos en la Tabla 12, calculamos los gastos e ingresos de la inversión.

Alternativa	% sombreado	Valor de la inversión (€)	Ingresos por venta de Energía (€/año)	Ingresos no percibidos de la actividad agrícola (€/año)	Flujo de caja anual (€)
1	10%	150.000,00 €	16.643,32 €	-	16.643,32 €
2	15%	225.000,00 €	24.964,98 €	11.880,00 €	13.084,98 €
3	30%	450.000,00 €	49.929,97 €	25.080,00 €	24.849,97 €
4	50%	750.000,00 €	83.216,61 €	35.640,00 €	47.576,61 €

Tabla 12. Datos de ingresos considerados en el cálculo de la rentabilidad para grandes productores de energía asociados a la actividad agrícola

- Para el análisis económico de la inversión se han utilizado los valores del VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa Interna de Rendimiento) y ROI (Recuperación de la Inversión), considerando un Tasa de Descuento del 4,77% y un periodo de amortización de las inversiones de 25 años. En la Tabla 13 se resumen los valores calculados tanto en el caso de considerar la inversión fotovoltaica asociada a la cubierta del invernadero, como en el caso de realizar la misma inversión de paneles fotovoltaicos en un terreno independiente, sin que el sombreado provocado afectara a la producción agrícola. En este caso es significativo resaltar como la pérdida de rentabilidad de los ingresos por la actividad agrícola hacen que el proyecto no sea viable.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Considerando actividad agrícola simultánea				Sin actividad agrícola simultánea			
Alternativa	VAN	TIR	Payback	Alternativa	VAN	TIR	Payback
1	85.973,30 €	10,1%	10 años	1	85.973,30 €	10,1%	10 años
2	-34.603,03 €	3,1%	18 años	2	128.959,95 €	10,1%	10 años
3	-87.379,72 €	2,7%	19 años	3	257.919,90 €	10,1%	10 años
4	-60.822,43 €	3,9%	16 años	4	429.866,50 €	10,1%	10 años

Tabla 13. Análisis económico de inversiones por encima de los 100 kWp

CAPITULO 5. DISCUSIÓN

El estudio de los parámetros climáticos y de producción sobre el invernadero en los distintos tratamientos fue llevado a cabo en un ciclo de cultivo con fecha de inicio 17 de septiembre de 2014 y fecha de finalización 14 de mayo de 2015.

Durante los meses estudiados, el patrón de comportamiento de la radiación exterior e interior en el tratamiento 0% de sombreado, fue coherente con lo descrito por otros autores cuyos trabajos se realizaron en la misma comarca (Ureña-Sánchez et al, 2012) y (Aroca-Delgado et al, 2019): *La mayor radiación exterior e interior del invernadero se produjo en mayo, y la menor radiación se produjo en los meses de noviembre a enero, registrándose la mínima en el mes de diciembre.*

El uso de paneles fotovoltaicos reduce la radiación solar que entra al interior del invernadero, siendo más acusada la reducción cuanto mayor es la superficie y la opacidad de los paneles. En el ensayo de la presente tesis, se utilizaron una combinación de 36 módulos fotovoltaicos y láminas de polietileno de alta densidad color negro, totalmente opacas para generar los sombreados en cubierta descritos en el diseño experimental.

Para registrar la radiación interior en el invernadero y la disminución provocada por los diferentes tratamientos de sombreado se realizó la medida de la radiación PAR en cada uno de los tratamientos.

Durante el periodo estudiado, la radiación fotosintéticamente activa del interior del invernadero fue mayor en el testigo. En los tratamientos de 15%, 30% y 50% de sombreado **la reducción de radiación PAR fue proporcionalmente superior a la superficie de sombreado exterior**, coincidiendo con lo descrito por autores como (Bulgari et al, 2015) y (Cossu et al, 2018). En concreto, la reducción del 15%, 30% y 50% de superficie de sombra produjo una reducción de la radiación PAR real del 28.8%, 46.6% y 66.3% respectivamente.

Los resultados sobre el tratamiento del 50% de sombreado son similares a los obtenidos por (Cossu et al, 2014), con el mismo % de sombreado en Italia, donde la reducción de la radiación PAR como consecuencia del tratamiento de sombreado fue del 64%; este estudio presenta características muy similares al tratamiento del 50% sombreado planteado en la tesis, con la diferencia de la orientación del eje del invernadero.

La relación existente entre los niveles de sombreado en cubierta y la disminución de radiación PAR disponible para los cultivos depende de diversos factores como el tipo de placas, la estructura del invernadero, la orientación del eje del mismo, la altura o la disposición de las placas sobre la cubierta, bien sea en bloques, en bandas o en disposición de tablero de ajedrez.

En este sentido, (Cossu et al, 2018) afirman que la radiación global anual disminuye un 0.8% por cada 1.0% adicional de cobertura fotovoltaica en el techo en invernaderos con orientación E-W y un 0,6% para el caso de invernaderos orientados N-S. Este estudio, llevado a cabo a través de modelización con algoritmos y simulación numérica difiere ligeramente de los datos tomados en el invernadero estudiado: con una orientación N-S, un 1.0% adicional de sombra en la superficie del techo (como valor medio de los tratamientos 15%, 30% y 50%) redujo 1,6% la radiación PAR. Los resultados, están por

tanto en línea con el algoritmo utilizado por (Cossu et al, 2018), con una desviación poco significativa, que puede ser debido a la superficie relativamente pequeña de los invernaderos modelizados en este estudio, con superficies inferiores a 500 m², frente al invernadero donde se tomaron los datos con una superficie de 2.415 m².

En relación a la **temperatura media mensual entre los tratamientos de sombra**, podemos apreciar la tendencia de mayor temperatura en el tratamiento control en las horas centrales del día, y la menor temperatura en el tratamiento del 50% en el momento de la salida del sol. Esta tendencia general se ve alterada por datos registrados en enero, donde la mayor temperatura se produjo en el 50% y durante el mes de febrero, donde la temperatura inferior fue registrada en el tratamiento control y 30%. También es reseñable, que durante las horas centrales del día, los tratamientos de control y tratamiento del 50% son aquellos en los que la temperatura es mayor, siendo la temperatura en el tratamiento del 50% superior a la de los tratamientos del 15% y 30%. Esto puede deberse a que los tratamientos 0 y 50% se encuentran en las zonas de bandas frontales del invernadero y una acumulación de temperatura en la zona Norte del mismo (zona del tratamiento 50%) debido a que los tratamientos no estaban físicamente separados entre sí.

Durante el ciclo de cultivo, realizado en sistema hidropónico con sustrato de fibra de coco, fueron registrados los **Parámetros de pH y Conductividad Eléctrica** de la solución del sustrato. En consonancia por lo registrado por (Ureña-Sánchez et al, 2012) en un ensayo de similares características en la zona, los tratamientos con mayor sombreado registraron conductividades eléctricas estadísticamente inferiores a los tratamientos control y 15%. Si bien este ensayo fue realizado en condiciones de suelo, es significativa la tendencia observada. Esta relación es consistente con que el sombreado es asociado con niveles más bajos de CE del sustrato debido a un uso más eficiente del agua (Lorenzo et al, 2006). Esta relación también fue observada en el pH del sustrato.

La reducción de la luz que incide sobre las plantas de tomate reduce la fotosíntesis y el rendimiento (Kläring y Krumbein, 2013). El sombreado excesivo que producirían los módulos fotovoltaicos ubicados en el exterior del techo de invernadero en nuestro estudio redujo el rendimiento total y comercial en el del cultivo. El principal motivo de la pérdida de rendimiento es el desequilibrio que se produce en el balance energético en el interior de los invernaderos. Esto coincide con lo indicado por otros autores, que afirman que los niveles de sombreado elevados reducen el rendimiento del cultivo de tomate bajo invernadero, como consecuencia de la reducción de la radiación (Cockshull et al, 1992), (Challa y Bakker, 1998), (Kläring y Krumbein, 2013), (Cossu et al, 2014), (Bulgari et al, 2015)).

Además, el incremento del porcentaje de sombra redujo de forma proporcional el rendimiento del cultivo, coincidiendo con lo descrito por (Callejón-Ferre et al, 2009). El sombreado elevado estudiado también redujo la precocidad de la producción y retrasó la producción al final del ciclo de cultivo, coincidiendo con lo descrito por (Cockshull et al, 1992). Esto hizo que el sombreado superior al 30% produjera mayor producción de frutos inmaduros no comercializables en la última recepción. El resultado de los ensayos muestra que cubrir el techo del invernadero con un elevado número de módulos fotovoltaicos reduce excesivamente la radiación interior a niveles que afectan al

rendimiento del cultivo, incluso en países mediterráneos de baja latitud y donde la radiación no suele ser un factor limitante en los cultivos.

Estudios anteriores muestran que sombrear el techo del invernadero reduce el número de frutos producidos, y estos son más pequeños (Cockshull et al, 1992); (Gent, 2007), (Bénard et al, 2015).

Estudios realizados en invernaderos tipo Almería o canario con sombreos moderados (10%), como son los realizados por (Ureña-Sánchez et al, 2012), (Aroca-Delgado et al, 2019), realizados en la provincia de Almería, y el realizado por (Ezzaeri et al, 2018), en Agadir (Marruecos), obtuvieron como resultado que se obtuvieron frutos de menor tamaño pero no se afectó negativamente el rendimiento.

Lo afirmado por estos estudios anteriores coincide con nuestros resultados, en donde el sombreado excesivo redujo el número de frutos producidos, y estos fueron de menor tamaño. Además, la reducción del peso del fruto fue mayor cuanto mayor era el sombreado.

Sin embargo, en el resultado obtenido para el 15% de sombreado en esta tesis, ya se observa una disminución del rendimiento del cultivo. Sería por tanto interesante explorar el comportamiento del cultivo de tomate en el rango de sombreado del 10 al 15% y encontrar la causa a las diferencias encontradas entre los resultados de esta tesis y los resultados previos citados en las condiciones de radiación de la provincia de Almería.

Las diferencias pueden deberse a la influencia de la tipología de estructura y grado de tecnificación utilizado en los ensayos. Mientras que los ensayos realizados por (Ureña-Sánchez et al, 2012), (Aroca-Delgado et al, 2019), y (Ezzaeri et al, 2018), fueron realizados en un invernadero tipo Almería con poca tecnificación, los ensayos realizados en esta tesis se realizaron en un invernadero tipo industrial con mayor grado de tecnificación y control de parámetros climáticos.

Esta circunstancia podría haber afectado al tratamiento estadístico de los análisis, ya que las diferencias de producción entre los tratamientos y el testigo no fueron lo suficientemente grandes como para mostrar diferencias significativas. También parece lógico pensar que en invernaderos muy tecnificados donde todas las variables de la producción están bien ajustadas, una reducción de radiación puede llegar a ser el factor limitante de la producción al desequilibrar el mencionado ajuste, mientras que en invernaderos con poca tecnificación, podría darse el caso de que una reducción de radiación, especialmente en zonas donde ésta es cuantiosa como en Almería y Agadir), no llegue a ser el factor limitante de la producción, ya que ésta aún se puede ver limitada por otros factores como la temperatura, el riego u otros factores no ajustados/tecnificados. Otra alternativa sería considerar % de sombreado intermedios entre el 10% y el 15% para ver si se observa una progresión de los efectos.

En países mediterráneos, donde la radiación solar satisface suficientemente las necesidades de las plantas, el sombreado exterior moderado con láminas fotovoltaicas no afecta los SST, color, firmeza y pH del fruto de tomate (Ureña-Sánchez et al, 2012), (Aroca-Delgado et al, 2019). En cambio, un sombreado excesivo puede afectar la calidad del fruto (Cossu et al, 2018); (Roslan et al, 2018)). Trabajos realizados en el sureste español por (Callejón-Ferre et al, 2009) mostraron que niveles de sombra superiores al 40% aumentan la firmeza y reducen los Sólidos Solubles Totales del fruto. En nuestro

estudio, el sombreado superior al 30% redujo los SST y aumentó la firmeza del fruto con respecto al control. En el caso de la intensidad del color rojo del fruto, se redujo con respecto al testigo con una menor intensidad de sombra (a partir del 15%). El pH del fruto no se afectó por el sombreado exterior.

Esto coincide con lo descrito por otros autores cuando se aplica un sombreado moderado (Ureña-Sánchez et al, 2012), (Aroca-Delgado et al, 2019) y/o un sombreado elevado (Callejón-Ferre et al, 2009), (Dorais et al, 2008) afirman que la calidad del fruto de tomate está muy afectada por el medio ambiente (intensidad y duración de la radiación, temperatura, riego, fertilización, etc.). Las plantas de tomate cultivadas bajo alta radiación solar producen frutos con altos niveles de azúcares (Winsor y Adams, 1976), por tanto, el contenido de azúcar de los tomates cultivados en el invernadero fotovoltaico se debe a la mayor o menor disponibilidad de radiación solar. Este hecho justifica en nuestro estudio el descenso de SST cuando la superficie de sombra en el techo del invernadero supera el 30%.

En relación a la rentabilidad que ofrecería para el agricultor la instalación de placas fotovoltaicas en la cubierta del invernadero, los datos obtenidos ofrecen una rentabilidad positiva, aunque limitada de la inversión en los diferentes supuestos calculados. Los resultados para el supuesto de una instalación para autoconsumo de un invernadero tipo en Almería ofrecen un periodo de amortización estimado de 13 años. Estos datos son, ligeramente superiores a los obtenidos por (Wang et al, 2017), que estima el periodo de amortización de los invernaderos fotovoltaicos con tecnología moderna en China, alrededor de los 9 años. No obstante, en un entorno de inestabilidad de los precios en el mercado eléctrico y el previsible incremento de la factura energética el caso estudiado como referencia, para el autoconsumo de las necesidades medias del invernadero se considera una alternativa viable, máxime cuando en la actualidad existen diferentes instrumentos para la obtención de subvenciones por parte de la administración autonómica. En este caso, la rentabilidad se ve incrementada sensiblemente, recuperando la inversión en un tiempo récord.

En el caso del planteamiento realizado de grandes inversiones por encima de los 100 kWh, la única alternativa que se presenta como viable es aquella en la que el sombreado fotovoltaico no compromete la producción agrícola (10% de cobertura fotovoltaica del invernadero), mejorando la rentabilidad con respecto al escenario base. En el caso de % de sombreado mayores, la pérdida de ingresos derivados de la falta de producción como consecuencia del sombreado, lastran las ganancias netas del agricultor. Adicionalmente, en el caso de grandes inversiones fotovoltaicas asociadas al invernadero, deberían considerarse aspectos adicionales no contemplados en los supuestos como las necesidades de mantenimiento de una gran instalación, la existencia de una red eléctrica apropiada para el vertido a red, la necesidad de refuerzo de la estructura del invernadero, etc.

Además de los aspectos económicos analizados, hay otros valores adicionales que incrementan el valor añadido de una instalación fotovoltaica para autoconsumo en el invernadero, como es el incremento de la sostenibilidad y disminución de la huella de Carbono de la producción, cada vez más valorados en los mercados europeos.

CAPITULO 6.

**CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE
INVESTIGACIÓN**

El objetivo de la tesis ha sido la evaluación del potencial tanto técnico como económico de los invernaderos en la provincia de Almería para la compatibilización de la producción hortícola y energética con paneles fotovoltaicos. Para ello, se han evaluado los efectos de diferentes porcentajes de sombreo (15%, 30% y 50%) en la calidad comercial de frutos de tomate producidos bajo invernadero en las condiciones de Almería y se ha valorado la rentabilidad de las inversiones.

Los resultados de evaluación técnica evidencian que colocar en el techo del invernadero paneles fotovoltaicos opacos tal que la superficie sombreada sea $\geq 15\%$ de la superficie, reduce la radiación del invernadero a niveles que perjudican el rendimiento del cultivo y la calidad del fruto. El sombreo exterior elevado también reduce la precocidad de la producción y retrasa la producción al final del ciclo de cultivo.

Como principales conclusiones obtenidas, tras el análisis realizado podemos destacar:

- *La instalación de un elevado número de módulos fotovoltaicos en el techo del invernadero con orientación norte-sur reduce excesivamente la radiación interior a niveles que afectan al rendimiento del cultivo, incluso en las condiciones de Almería y otros países mediterráneos de baja latitud y donde la radiación no suele ser un factor limitante en los cultivos.*
- *La producción total y comercial del cultivo de tomate son inversamente proporcionales al incremento del porcentaje de sombra en cubierta, en los tres tratamientos utilizados en esta tesis. Además, el sombreo excesivo reduce el número de frutos producidos, y estos son de menor tamaño.*
- *El sombreo elevado estudiado también redujo la precocidad de la producción y retrasó la producción al final del ciclo de cultivo, lo que provocó que el sombreo superior al 30% produjera mayor producción de frutos inmaduros no comercializables en la última recolección.*
- *El sombreo moderado, no afectó a la calidad del fruto, excepto en el color, el cual se afectó negativamente a partir del 15% de sombra. El sombreo superior al 30% redujo la calidad de los frutos. Los SST se redujeron con el sombreo elevado con respecto al control. El pH del fruto no se afectó por el sombreo exterior estudiado.*

La presente tesis ha buscado complementar los estudios realizados por investigadores como (Ureña-Sánchez et al, 2012), (Aroca-Delgado et al, 2019) y (Ezzaeri et al, 2018), con sombreos del 10% en invernaderos tipo Almería o tipo canario, los cuales muestran que estos niveles de sombreo moderados no afectan al rendimiento del cultivo del tomate. Sin embargo, el nivel de sombreo más bajo planteado en esta tesis, del 15%, muestra diferencias estadísticamente significativas de reducción del rendimiento. Es por tanto, una de las líneas de trabajo para la continuación de la línea de investigación.

Desde el punto de vista económico, la instalación de paneles fotovoltaicos como alternativa para el autoconsumo eléctrico en invernaderos mediterráneos de baja demanda energética, se presenta como una alternativa económicamente viable, que además ofrece ventajas adicionales derivadas de la reducción de la huella de carbono de la explotación. Sin embargo, % de sombreo elevados como los estudiados en la tesis, comprometerían los ingresos por producción agrícola, haciendo inviable en su conjunto las inversiones planteadas.

Adicionalmente, el marco legislativo sobre instalaciones fotovoltaicas, las posibles subvenciones y fluctuaciones en el precio de instalación, la regulación en el mercado de venta de la Energía y condiciones de vertido a red pueden comprometer en gran medida la rentabilidad de las inversiones, por lo que a la hora de acometer las mismas existen cierto grado de incertidumbre y riesgos a asumir.

Se identifican a continuación diversas líneas de trabajo con las que se pretende continuar el trabajo iniciado con la tesis en un futuro, desarrollando el concepto de invernaderos fotovoltaicos para la producción simultánea de electricidad y cultivos hortícolas con alta demanda de radiación. No se contempla en este trabajo el estudio de invernaderos fotovoltaicos para fines principalmente energéticos, donde los cultivos del interior del invernadero no suponen un limitante en términos de radiación (algunas especies de flor cortada, setas, etc.)

Futuras líneas de investigación:

1. Optimización del diseño de invernaderos fotovoltaicos en entornos mediterráneos

El invernadero fotovoltaico como concepto presenta un amplio campo de investigación para la optimización tanto de la producción fotovoltaica como la producción agrícola.

Hasta el momento, el desarrollo de las investigaciones en invernaderos fotovoltaicos se ha concentrado fundamentalmente en aspectos como los efectos del sombreado sobre los cultivos, niveles de sombreado óptimos, niveles de producción eléctrica o estudios socio-económicos.

Sin embargo, las estructuras de invernaderos utilizadas han sido “adaptadas” al nuevo uso de la instalación de placas fotovoltaicas en cubierta a las diferentes estructuras existentes, bien se trate el caso de invernaderos industriales tipo Venlo o multitúnel, o estructuras más sencillas como los invernaderos tipo Almería o tipo canario.

En el caso de la presente tesis, el estudio se realizó sobre el invernadero bajo patentado “SOLNOVA”. Este invernadero fue en su momento diseñado para permitir desde el punto de vista estructural la colocación de placas fotovoltaicas de silicio amorfo en su cubierta, sin embargo, no se diseñó con el objeto de optimizar la proyección de sombras sobre el cultivo o maximizar el rendimiento fotovoltaico.

En este sentido, se identifican diversas **líneas de trabajo**:

- Optimización de la altura del invernadero, orientación, pendientes y materiales de cubierta para maximizar la radiación PAR captada hacia el interior del invernadero y una elevada eficiencia de producción eléctrica.
- Identificar las causas de las diferencias encontradas en los efectos del sombreado entre los diferentes tipos de estructuras como por ejemplo las diferencias entre los invernaderos raspa y amagado y/o tipo canario con respecto a los invernaderos tipo industrial (multitúnel o tipo Venlo). Tal y como se plantea en la discusión de los resultados sería necesario ampliar las investigaciones en

relación a las diferencias encontradas entre % de sombreado del 10% y del 15% en invernaderos de ambas tipologías en las condiciones de Almería.

Para ello, se plantearía un ensayo ubicado en una zona de abundante radiación solar como Almería, con 8 módulos de invernadero, cuatro módulos industriales-tecnificados y otros cuatro módulos tipo Almería, en los que se llevarían a cabo cuatro tratamientos: T0- testigo sin fotovoltaica, T1- con sombreado fotovoltaico del 10% y T2 con sombreado fotovoltaico del 12,5% y T3 con sombreado fotovoltaico del 15%.

- Diseño de estructuras dinámicas, como seguidores solares, que optimicen la proyección de sombras y la producción fotovoltaica. Este aspecto ha sido recientemente abordado por (Moretti y Marucci, 2019), estudiando la viabilidad de cambiar el grado de sombreado dentro del invernadero basándose en la radiación solar disponible y las necesidades de las plantas, gracias a un sistema dinámico de paneles fotovoltaicos en cubierta.
- Optimización de la colocación y distribución de paneles fotovoltaicos. Estudios como los iniciados por RUFEPa en el proyecto europeo SUN4GREEN, concentrando la colocación de los paneles en la zona de canales de cubierta, abren un nuevo campo a la optimización de la proyección de las sombras, que idealmente deben minimizarse o dirigirse hacia zonas improductivas como los pasillos del invernadero o incluso al exterior del mismo. Por otro lado, identificada la problemática de la reducción de la eficiencia de las placas como consecuencia de las temperaturas alcanzadas en la cubierta de invernaderos, el diseño de un sistema optimizado de colocación de placas, que permita la refrigeración de los mismos en épocas de calor también se identifica como una línea de mejora.

Desde el punto de vista de la adaptación de estructuras existentes a la conversión hacia invernaderos fotovoltaicos se identifican las siguientes **líneas de trabajo**:

- Estudio de capacidad de carga de las estructuras frente a la colocación de paneles fotovoltaicos de diferentes tipologías. Si bien el uso de tecnologías “*Thin film*” minimiza los potenciales problemas de carga estructural, su limitada eficiencia hace que no sea económicamente rentable su uso. Por ello, la consideración desde el punto de vista estructural de las limitaciones, distribución de cargas y esfuerzos como resultado de la colocación de las placas y diseño de refuerzos es interesante de cara a que los agricultores puedan acometer la inversión en condiciones de seguridad.
- Estudio sobre métodos para la realización de las operaciones de mantenimiento de cubierta (cambio de plástico, blanqueo, etc) del invernadero y de la instalación fotovoltaica en condiciones de seguridad para los trabajadores. La Prevención de Riesgos Laborales en las operaciones de construcción y mantenimiento del invernadero sigue siendo una asignatura pendiente, que debe solventarse de cara a nuevas operaciones en cubierta como es el caso del mantenimiento de placas. El desarrollo de líneas de vida o estructuras auxiliares que permitan

compatibilizar las operaciones de cubierta habituales de la producción agrícola con la instalación de placas es necesaria.

- Estudios de simulación y optimización de la colocación de placas. En línea con las investigaciones de (Cossu et al, 2018), la optimización para estructuras comerciales habituales, del % de sombreado fotovoltaico y la óptima distribución de paneles (franjas homogéneas, tresbolillo, franjas alternas, etc.), permitiría desarrollar herramientas de apoyo a la toma de decisiones desde el punto de vista de la eficiencia económica y productiva para el agricultor.

2. Efectos de la orientación del invernadero

En los invernaderos fotovoltaicos del sur de Europa, la orientación de la estructura suele ser Este-Oeste, siendo esta la orientación de la estructura en la mayoría de las investigaciones realizadas sobre la producción de energía fotovoltaica (Ureña-Sánchez et al, 2012); (Pérez-Alonso et al, 2012); (Yano et al, 2010); (Aroca-Delgado et al, 2019)).

La orientación de los invernaderos, ha sido objeto de análisis y discusión científica por parte de numerosos investigadores. La orientación del eje principal del invernadero, contribuye a optimizar las condiciones climáticas y eficiencia energética del invernadero, dependiendo la orientación óptima de la latitud de la localización, que determinará la variabilidad de la trayectoria de la radiación solar y su intensidad. En la reciente revisión realizada por (Choab et al, 2019), concluyen que la mayoría de los autores coinciden en que la orientación Este- Oeste es la mejor para todas las latitudes, ya que determina unas menores necesidades energéticas y proporciona una radiación solar recolectada por el invernadero mayor.

Asimismo, en cuanto a la búsqueda de la eficiencia en la producción fotovoltaica, la colocación de las placas en la vertiente Sur proporciona un incremento de la producción eléctrica.

Esta orientación Este-Oeste de los invernaderos, es, sin embargo, poco habitual en los invernaderos en el área de la provincia de Almería. *“Según el estudio de caracterización realizado por (Céspedes López et al, 2009), en los invernaderos de la provincia de Almería, predomina la orientación Norte-Sur del eje de cumbrera, con un 79,4% de la superficie total. El estudio atribuye el efecto del predominio de la orientación N-S a que en latitudes por encima de los 30° N se favorece la homogeneidad espacial en el crecimiento y producción del cultivo, ya que se consigue una mayor uniformidad en la distribución de la radiación entre diversos puntos del invernadero. Por el contrario con orientaciones de la cumbrera o raspa E-O se podría maximizar la captación de radiación en invierno (con el riesgo de generar sombras fijas), especialmente con pendientes de cubierta elevadas”.*

El efecto de la distribución solar en nuestras latitudes, se une a otro factor no menos importante, los vientos predominantes en la provincia de Almería, los cuales son de componente Este / Oeste mayoritariamente.

Así, el eje N-S de los invernaderos en la provincia de Almería, no solo busca la homogeneidad en la distribución de la producción sino fundamentalmente una optimización de la ventilación natural del invernadero, los cuales tienen

fundamentalmente una gestión pasiva del clima, al colocar la apertura de las ventanas en dirección perpendicular a los vientos predominantes.

Para el estudio realizado en la presente tesis, se ha trabajado con invernadero a dos aguas (tipo Venlo) con orientación Norte-Sur y estudiado los efectos de diferentes porcentajes de sombreo sobre la calidad y productividad del cultivo de tomate.

En los estudios revisados de similares características, la dirección predominante de estudio es la orientación E-W. (Yano et al, 2009) estudiaron la energía eléctrica generada por módulos fotovoltaicos montados dentro del techo de un invernadero orientado Norte-Sur en Japón, concluyendo que ángulos de instalación pequeños eran mejores para obtener mayores rendimientos eléctricos (20° frente a 28°). En cambio, en dicho estudio no se evaluó el efecto que produjo el sombreo de los módulos fotovoltaicos sobre el cultivo.

Por tanto, se identifica como **línea de trabajo** el estudio de láminas fotovoltaicas en estructuras con orientación Norte-Sur del eje principal del invernadero, sobre diferentes tipos de estructuras para nuestra latitud.

3. Uso combinado de invernaderos fotovoltaicos con sistemas de iluminación artificial

La limitación en el uso extensivo de invernaderos fotovoltaicos, viene derivada, como se ha expuesto, de los efectos del sombreo sobre la producción y calidad comercial de los cultivos. Esto puede ser solventado mediante el uso de materiales /dispositivos que incrementen la radiación interceptada por la planta, supliendo las necesidades que no son satisfechas debido al sombreo fotovoltaico. Entre las **líneas de trabajo** a desarrollar en este ámbito se identifican:

- Uso combinado de fotovoltaica con iluminación artificial en las condiciones del área mediterránea. El uso de luminarias no es habitual en los invernaderos mediterráneos debido a las condiciones meteorológicas de alta radiación. Sin embargo, el uso de diferentes lámparas (fluorescentes, haluros de metal, alta-presión de sodio, o LED) es habitual en otras latitudes como Holanda o Francia. Es interesante, por tanto, el análisis del uso combinado de luz suplementaria en el cultivo y su alimentación energética con las propias placas fotovoltaicas. En este caso, es asimismo necesario encontrar el equilibrio necesario entre las necesidades de radiación de la planta y el sombreo fotovoltaico. En este sentido (Cossu et al, 2014), estudió el uso de luces artificiales en un ensayo de sombreo fotovoltaico del 50% de cobertura en cubierta. Las luces instaladas, de alta presión de sodio, fueron utilizadas 8 horas diarias en periodos de radiación baja y en periodos de cosecha. Sin embargo, los resultados del estudio demostraron que la iluminación artificial no fue suficiente para provocar efectos en la producción del cultivo.
- Uso combinado de módulos fotovoltaicos con láminas aluminizadas reflectantes colocadas en el suelo (o bajo las plantas) en las franjas sombreadas. Estas láminas son utilizadas en cultivos para incrementar la radiación reflejada y

absorbida por la planta, y podría ser de interés su uso en aquellas zonas del invernadero que se vean afectadas por el sombreado.

- Uso de lentes o espejos para incrementar la eficiencia de los sistemas. (Moretti y Marucci, 2019), en el estudio realizado para el diseño de un sistema de sombreado variable en cubierta de invernadero, introdujo el uso de espejos de aluminio para incrementar la incidencia de radiación sobre las placas. Este tipo de espejos sustituyen a los tradicionales de cristal se utilizan en la actualidad en aplicaciones industriales como en heliostatos, mejorando las capacidades en cuanto a resistencia, corrosión, posibilidad de suministro de grandes piezas, menor riesgo de roturas, facilidad en la manipulación y reducido peso.

4. Estudio de rendimientos de los materiales fotovoltaicos y su comportamiento sobre cubierta de invernaderos

Como hemos visto en la Tabla 3, las placas de silicio cristalino y las células orgánicas o *Thin Film* han sido las más comúnmente utilizadas en los ensayos de invernaderos fotovoltaicos.

Sin embargo, los materiales fotovoltaicos han evolucionado, siendo cada vez más asequibles materiales de nueva generación como las células mixtas o materiales híbridos orgánicos- inorgánicos. Aspectos limitantes como la baja eficiencia de las primeras células thin-film, en torno a un 5-7% teóricas, se ven hoy en día ampliamente superados por materiales como los back-contact, con las propiedades de bajo peso y flexibilidad del thin-film pero con eficiencias cercanas al 20%.

Por tanto, se identifican en este campo, las siguientes **líneas de trabajo**:

- Estudio de las eficiencias reales de los diferentes materiales fotovoltaicos y su adaptación a la colocación de en cubierta de invernaderos
- Estudio de las degradaciones y pérdidas de rendimiento de las placas como consecuencia de las condiciones de uso, con altas temperaturas y alta movilidad y vibraciones por fenómenos de viento. Autores como (Harjunowibowo et al, 2018), han documentado estudios de diversos autores que ponen de relevancia que la eficiencia de los paneles fotovoltaicos disminuye marcadamente por el exceso de calor que se genera en el ambiente del invernadero. Asimismo, (Magadley et al, 2020), ha puesto de manifiesto la problemática de los daños provocados por el viento en las conexiones y material de placas orgánicas. Este factor, es de especial relevancia en el entorno de la provincia de Almería, ya que los fuertes vientos y las habituales roturas de plástico podrían comprometer la rentabilidad y uso seguro de invernaderos fotovoltaicos.

De especial interés para la aplicación en el sector de los invernaderos es el uso de placas solares con tecnología bifacial, que aprovechan la luz en ambas caras de la placa para la generación de energía. De esta manera, la radiación difusa del interior del invernadero, provocada por el albedo, incrementaría el aprovechamiento de la superficie destinada a la producción fotovoltaica.

Aunque no son muchas las referencias del uso de este tipo de materiales en aplicaciones en invernadero, (Yano et al, 2014) y (Li et al, 2018) han trabajado la

integración de las mismas, evaluando el incremento en la producción de energía, y su viabilidad, no obstante, no han sido valorados los efectos sobre el cultivo.

5. Análisis de Ciclo de Vida de la introducción de Energía Fotovoltaica en sistemas de invernaderos

Los estudios realizados sobre fotovoltaica en invernadero hasta el momento han registrado aspectos tales como la producción de energía eléctrica o efectos sobre el cultivo. Sin embargo, la consideración de aspectos ambientales del sistema en su conjunto y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida del producto, en este caso un kg de hortaliza, no han sido valorados en su conjunto.

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida considera toda la historia del producto, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo, teniendo en cuenta el transporte, el uso de recursos, la fabricación, la distribución a mercados. La aplicación de esta metodología de “contabilidad ambiental” está armonizada mediante dos normas ISO:

- *“UNE-EN ISO 14040. (2006) Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia”.*
- *“UNE-EN ISO 14044. (2006). Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices”.*

Esta metodología establece una serie de indicadores de impacto, siendo los indicadores más aceptados:

- Calentamiento global
- Agotamiento del ozono estratosférico
- Agotamiento de recursos abióticos
- Impactos del uso del suelo. Competencia por el suelo.
- Toxicidad en humanos
- Ecotoxicidad:
 - Ecotoxicidad acuática en aguas dulces.
 - Ecotoxicidad en agua marina
 - Ecotoxicidad terrestre
- Formación de foto-oxidantes
- Acidificación o Eutrofización

Otras categorías de impacto más específicas consideran impactos del uso del suelo o agotamiento de recursos bióticos.

Por ello se propone como **línea de trabajo** la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida a los sistemas de invernaderos fotovoltaicos y la generación de alternativas mediante esta metodología para evaluar el impacto global en el medioambiente de los diferentes sistemas productivos. Alternativas tales como la evaluación de los diferentes tipos de cultivos, sistemas de calefacción, tipo de tecnología fotovoltaica, sistemas de iluminación artificial complementaria, etc. son de interés para la generación de bases de datos, que junto con el análisis económico de las alternativas proporcionen sistemas de apoyo a la toma de decisiones de los agricultores para la realización de inversiones.

CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- AGAPA, Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía. Caracterización de los invernaderos de Andalucía. **2015**. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/observatorio/servlet/FrontController?action=DownloadS&table=12030&element=1586185&field=DOCUMENTO> (fecha de consulta: 9 de febrero de 2021).
- Al-Ibrahim, A.; Al-Abadi, N; Al-Helal, I. PV greenhouse system- system description, performance and lesson learned. *Acta Hortic.* **2006**, 710, 251-264 doi:10.17660/ActaHortic.2006.710.26.
- Altuve G., José Germán. El uso del valor actual neto y la tasa interna de retorno para la valoración de las decisiones de inversión. *Actualidad Contable Faces* [en línea]. **2004**, 7(9), 7-17. ISSN: 1316-8533. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=25700902> (fecha de Consulta 8 de Febrero de 2021).
- ANPIER. Anuario Fotovoltaico 2019. **2019**. Disponible en: <https://anpier.org/wp-content/uploads/2019/06/anuario245x173-DEF.junio-2019-WEB.pdf> (fecha de consulta: 8 de febrero de 2021).
- Arana, J. Textural Properties of Foods. In *Physical Properties of Foods*. 1st edition; CRC Press: Boca Raton, Florida, **2012**; pp. 53–88. doi:10.1201/b11542-4.
- Armstrong, R.A. When to use the Bonferroni correction. *Ophthal. Physl. Opt.* **2014**, 34, 502–508. doi:10.1111/opo.12131.
- Aroca-Delgado, R.; Pérez-Alonso, J.; Callejón-Ferre, Á.; Velázquez-Martí, B. Compatibility between Crops and Solar Panels: An Overview from Shading Systems. *Sustainability*. **2018**, 10, 743. doi:10.3390/su10030743.
- Aroca-Delgado, R.; Pérez-Alonso, J.; Callejón-Ferre, Á.-J.; Díaz-Pérez, M. Morphology, yield and quality of greenhouse tomato cultivation with flexible photovoltaic rooftop panels (Almería-Spain). *Sci. Hortic.* **2019**, 257, 108768. doi:10.1016/j.scienta.2019.108768.
- Bénard, C.; Bernillon, S.; Biais, B.; Osorio, S.; Maucourt, M.; Ballias, P.; Deborde, C.; Colombié, S.; Cabasson, C.; Jacob, D.; *et al.* Metabolomic profiling in tomato reveals diel compositional changes in fruit affected by source–sink relationships. *J. Exp. Bot.* **2015**, 66, 3391–3404. doi:10.1093/jxb/erv151.
- Benda, V. Photovoltaics: The Basics, in *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, **2018**. Trevor M. Letcher, Vasilis M. Fthenakis. pp. 151-179. ISBN 9780128114797. doi:10.1016/B978-0-12-811479-7.00008-7.
- Bertin, N.; Fatnassi, H.; Vercambre, G.; Poncet, C. Simulation of tomato production under photovoltaic greenhouses. *Acta Hortic.* **2017**, 1170, 425–432. doi:10.17660/actahortic.2017.1170.52.

- Brealey, R.A., A.J. Marcus, y S.C Myers. *Principios de Dirección Financiera*. Madrid: McGraw-Hill., **1996**. ISBN; 978-8448106089
- Bulgari, R.; Cola, G.; Ferrante, A.; Franzoni, G.; Mariani, L.; Martinetti, L. Micrometeorological environment in traditional and photovoltaic greenhouses and effects on growth and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Ital. J. Agrometeorol*, **2015**, *20*, 27–38.
- Cajamar. *Análisis de la campaña hortofrutícola. Campaña 2018/2019*. Almería: Cajamar, **2019**. Disponible en: <https://infogram.com/analisis-de-la-campana-hortofruticola-1hd12y9wyv3x6km> (fecha de consulta: 10 noviembre 2020).
- Cajamar. *Análisis de la campaña hortofrutícola. Campaña 2019/2020*. Almería: Cajamar, **2020**.
- Callejón-Ferre, A.J.; Manzano-Agugliaro, F.; Díaz-Pérez, M.; Carreño-Ortega, A.; Pérez-Alonso, J. Effect of shading with aluminised screens on fruit production and quality in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions. *Span. J. Agric. Res.* **2009**, *7*, 41–49. doi:10.5424/sjar/2009071-396.
- Campiotti, C.; Dondi, F.; Genovese, A.; Alonzo, G.; Catanese, V.; Incrocci, L.; Bibbiani, C. Photovoltaic as Sustainable Energy for Greenhouse and Closed Plant Production System. *Acta Hortic.* **2008**, *797*, 373–378.
- Carreño-Ortega, A.; Galdeano-Gómez, E.; Pérez-Mesa, J.C.; Galera-Quiles, M.C. Policy and Environmental Implications of Photovoltaic Systems in Farming in Southeast Spain: Can Greenhouses Reduce the Greenhouse Effect? *Energies* **2017**, *10*, 761.
- Céspedes López A.J., García García M.C., Pérez-Parra J.J. , Cuadrado Gómez I.M. *Caracterización de la explotación hortícola protegida de Almería*. FIAPA. **2009**. ISBN: 84-88246-32-5
- Challa, H.; Bakker J. *Potential production within the greenhouse environment. Ecosystems of the world. The greenhouse ecosystem*. Elsevier: Enoch Z, Stanhill G. Amsterdam, **1998**, 333–348.
- Chaurey, A.; Kandpal, T.C. Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: An overview. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2010**, *14*, 2266–2278. doi:10.1016/j.rser.2010.04.005.
- Choab, N.; Allouhi, A.; El Maakoul, A.; Kousksou, T.; Saadeddine, S.; Jamil, A. Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, **2019**. 191: 109–137.
- Cockshull, K.E.; Graves, C.J.; Cave, C.R.J. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *J. Hortic. Sci.* **1992**, *67*, 11–24. doi:10.1080/00221589.1992.11516215.

- Cossu, M.; Cossu, A.; Deligios, P.A.; Ledda, L.; Li, Z.; Fatnassi, H.; Poncet, C.; Yano, A. Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic greenhouse types in Europe. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **2018**, *94*, 822–834. doi:10.1016/j.rser.2018.06.001.
- Cossu, M.; Murgia, L.; Ledda, L.; Deligios, P.A.; Sirigu, A.; Chessa, F.; Pazzona, A. Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity. *Appl. Energ.* **2014**, *133*, 89–100. doi:10.1016/j.apenergy.2014.07.070.
- Cuesta Roble (Oak Hill) Consulting. 2019 Statistics Update Supplement to the International Greenhouse Vegetable Production Statistics report (2018 edition). **2019**.
- Cuce, E.; Harjunowibowo, D.; Cuce, P. M. Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2016**, *64*, 34–59. doi:10.1016/j.rser.2016.05.077.
- Djevic, M.; Dimitrijevic, A. Energy consumption for different greenhouse constructions. *Energy.* **2009**, *34*, 1325–1331. doi:10.1016/j.energy03.008.
- Donoso, Jose. National Survey Report of PV Power Applications in Spain. UNEF, International Energy Agency, **2018**. Disponible en: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/NSR_Spain_2018.pdf (fecha de consulta: 5 de agosto de 2020)
- Dorais, M.; Ehret, D. L.; Papadopoulos, A. P. Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer. *Phytochem. Rev.*, **2008**, *7*, 231–250. doi:10.1007/s11101-007-9085-x.
- Elhag-Bahrawi. Economic evaluation of a passive solar greenhouse heating system in Crete, Greece. *Applied ecology and environmental research.* **2019**, *17*(2):4431-4446. doi: [10.15666/aeer/1702_44314446](https://doi.org/10.15666/aeer/1702_44314446)
- Emmott, C.J.M. ; Röhr, J.A. ; Campoy-Quiles, M.; Kirchartz, T.; Urbina A.; Ekins-Daukes, N.J. Organic photovoltaic greenhouses: a unique application for semi-transparent PV?. *Energy Environ Sci*, **2015**, *8*: 1317–28. doi: [10.1039/C4EE03132F](https://doi.org/10.1039/C4EE03132F)
- Ezzaeri, K.; Fatnassi, H.; Wifaya, A.; Bazgaou, A.; Gourdo, L.; Aharoune, A.; Bekkaoui, A. and Bouirden, L. Effects of roof-mounted flexible photovoltaic panels on solar radiation and tomato yield in Canarian greenhouse. *Acta Hort.* **2020**, *1296*, 87-92. doi: [10.17660/ActaHortic.2020.1296.12](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.12)
- Ezzaeri, K.; Fatnassi, H.; Bouharroud, R.; Gourdo, L.; Bazgaou, A.; Wifaya, A.; Demrati, H.; Bekkaoui, A.; Aharoune, A.; Poncet, C.; Bouirden, L. The effect of photovoltaic panels on the microclimate and on the tomato production under photovoltaic canarian greenhouses. *Sol. Energy.* **2018**, *173*, 1126–1134. doi:10.1016/j.solener.2018.08.043.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

- FAO. *Transforming Food and Agriculture to Achieve the SDGs: 20 interconnected actions to guide decision-makers*. **2018**. Disponible en: <http://www.fao.org/3/I9900EN/i9900en.pdf> (fecha de consulta 15 de enero de 2021).
- FAO. *How to feed the world in 2050*. Rome. **2009**. Disponible en: https://water2return.eu/wp-content/uploads/2017/11/FAO_How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf (fecha de consulta 15 de enero de 2021).
- Fernández, P; Martínez, M; Acin I.F. (2019). *Market Risk Premium and Risk-Free Rate used for 69 countries in 2019: Survey*, IESE Business School.
- Freund, R.J.; Wilson, W.J.; Mohr, D.L. Inferences for Two or More Means. In *Statistical Methods*, 3rd edition; Elsevier: Burlington, USA, 2010, pp. 245–320. doi:10.1016/b978-0-12-374970-3.00006-8.
- Friman-Peretz, M.; Geoola, F.; Yehia, I.; Ozer, S.; Levi, A.; Magadley, E.; Brikman, R.; Rosenfeld, L.; Levy, A.; Kacira, Teitel, M. Testing organic photovoltaic modules for application as greenhouse cover or shading element. *Biosystems Eng.* **2019**, *184*, 24–36. doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.05.003.
- Gent, M.P.N. Effect of shade on quality of greenhouse tomato. *Acta Hort.* **2007**, *747*, 107–112. doi:10.17660/actahortic.2007.747.10.
- Gómez, K.A.; Gómez, A.A. *Statistical Procedures for Agricultural Research*. Wiley: New York, USA, 1984.
- Harjunowibowo, D.; Ding, Y.; Omer, S.; Riffat, S. Recent active technologies of greenhouse systems – a comprehensive review. *Bulg. J. Agric. Sci.*, **2018**. *24* (1): 158–170
- Hassanien, R. H. E.; Li, M.; Dong Lin, W. Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2016**, *54*, 989–1001. doi:10.1016/j.rser.2015.10.095.
- Hernandez, C.; del Sagrado, J.; Rodríguez, F.; Moreno, J.C.; Sánchez, J.A. Modelling of energy demand of a high-tech greenhouse in warm climate based on bayesian networks. *Math. Probl. Eng.* **2015**, 2015, 201646.
- IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2019*. International Renewable Energy Agency, Abu- Dhabi: **2020**. ISBN: 978-92-9260-244-4. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf (fecha de consulta: 3 de diciembre de 2020).
- Junta de Andalucía. *Manual de la Secretaría General de Industria, Energía y Minas para la tramitación administrativa de las instalaciones de generación de energía eléctrica en régimen de autoconsumo en la comunidad autónoma de Andalucía*. **2019**.

Disponible en:
https://www.juntadeandalucia.es/export/drupalajda/20191118_Manual%20Autoconsumo%20Tras%20RD%20244%20v7.pdf (Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2020).

- Kanter, D. R. ; Schwoob, M. H. ; Baethgen, W. E. ; Bervejillo, J. E. ; Carriquiry, M. ; Dobermann, A. ; Ferraro, B. ; Lanfranco, B. ; Mondelli, M. ; Penengo, C. ; Saldias, R. ; Silva, M. E. ; Lima, J. M. S. de. Translating the Sustainable Development Goals into action: A participatory backcasting approach for developing national agricultural transformation pathways. *Global Food Security*, **2016**, 10: 71-79; doi: 10.1016/j.gfs.2016.08.002.
- Kläring, H.P.; Krumbein, A.; The Effect of Constraining the Intensity of Solar Radiation on the Photosynthesis, Growth, Yield and Product Quality of Tomato. *J. Agron. Crop. Sci.* **2013**, 199, 351–359, doi:10.1111/jac.12018.
- Red Eléctrica de España. *Las Energías Renovables en el Sistema Eléctrico Español*. **2019**. Disponible en:
https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/Renovables-2019.pdf (fecha de consulta 15 de octubre de 2020).
- Li, C.; Wang, H.; Miao, H.; Ye, B. The economic and social performance of integrated photovoltaic and agricultural greenhouses systems: Case study in China. *Applied Energy*, **2017**. 190: 204-212; doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.121.
- Li, Z.; Yano, A.; Cossu, M.; Yoshioka, H.; Kita, I.; Ibaraki, Y. Electrical Energy Producing Greenhouse Shading System with a Semi-Transparent Photovoltaic Blind Based on Micro-Spherical Solar Cells. *Energies*, **2018**, 11, 1681; doi:10.3390/en11071681.
- Li, Zhi; Akira Yano; Hidekazu Yoshioka. Feasibility study of a blind-type photovoltaic roof-shade system designed for simultaneous production of crops and electricity in a greenhouse. *Applied Energy*, **2020**. 115853; doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115853>.
- López, J.C., Baille, A., Bonachela, S., González Real, M.M., Pérez Parra, J. Predicting the energy consumption of heated plastic greenhouses in south-eastern Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, **2006**; 4(4): 289-296. ISSN 1695-971-X.
- López-Aragón L.; López-Liria R.; Callejón-Ferre A.J.; Pérez-Alonso J. Musculoskeletal disorders of agricultural workers in the greenhouses of Almería (Southeast Spain). *Safety Sci.* **2018**, 109, 219–235.doi:10.1016/j.ssci.2018.05.023.
- Lorenzo P.; García M.L.; Sánchez-Guerrero M.C.; Medrano E.; Caparros I.; Giménez M. Influence of mobile shading on yield, crop transpiration and water use efficiency. *Acta Hort.* **2006**, 719, 471–478.
- Luca La Notte; Lorena Giordano; Emanuele Calabrò; Roberto Bedini; Giuseppe Colla; Giovanni Puglisi; Andrea Reale. Hybrid and organic photovoltaics for greenhouse applications. *Applied Energy*, **2020**. 278, 115582. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115582>.

- Magadley, E.; Teitel, M.; Peretz, M. F.; Kacira, M.; Yehia, I. Outdoor behaviour of organic photovoltaics on a greenhouse roof. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **2020**,37, 100641. doi: doi.org/10.1016/j.seta.2020.100641 R.
- MAPAMA. «Superficies, producciones, rendimiento y destino de los principales cultivos.» **2019**. Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/> (fecha de consulta: 20 de junio de 2020).
- Marucci, A.; Zambon, I.; Colantoni, A.; Monarca, D. A combination of agricultural and energy purposes: Evaluation of a prototype of photovoltaic greenhouse tunnel. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, 82, 1178–1186.
- Marucci, A.; Gusman, A.; Pagniello, B.; Cappuccini, A. Limits and prospects of photovoltaic covers in Mediterranean greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* **2013**, 43, 1. doi:10.4081/jae.2013.e1.
- Marucci, A.; Monarca, D.; Cecchini, M.; Colantoni, A.; Manzo, A.; Cappuccini, A. The Semitransparent Photovoltaic Films for Mediterranean Greenhouse: A New Sustainable Technology. *Math. Prob. Eng.* **2012**, 2012, 1–14. doi:10.1155/2012/451934.
- McIntosh, M.S. Analysis of combined experiments. *Agron. J.* **1983**, 75, 153–155.
- Mekhilef, S.; Famarzi, S.Z. ; Saidur, R.; Salam, Z. The application of solar technologies for sustainable development of agricultural sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2013**. Elsevier, vol. 18(C), pages 583-594. DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.049
- Minuto G, Tinivella F, Bruzzone C, Minuto A. Con il fotovoltaico sul tetto la serra raddoppia la sua utilità. *Supplemento a L'Informatore Agrario* **2011**, 38:2–6.
- Mohammadi, A.; Omid, M. Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Appl. Energy* **2010**, 87, 191–196.doi:10.1016/j.apenergy.2009.07.021.
- Molina, Jerónimo. El papel de la Agricultura Intensiva en la economía de la Provincia de Almería. *Revista de humanidades y ciencias sociales del IEA*, **2003**: 13-38. ISSN 1139-8205.
- Montgomery, D.C. *Design and analysis of experiments*. John Wiley and Sons Inc.: New York, USA, 1991.
- Moretti, S.; Marucci, A. A Photovoltaic Greenhouse with Variable Shading for the Optimization of Agricultural and Energy Production. *Energies* **2019**, 12, 2589. doi:10.3390/en12132589.

- Ntinas, G. K.; Neumair, M.; Tsadilas, C. D.; Meyer, J. Carbon footprint and cumulative energy demand of greenhouse and open-field tomato cultivation systems under Southern and Central European climatic conditions. *J. Cleaner Prod.* **2017**, *142*, 3617–3626. doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.106.
- Ouazzani Chahidi, Laila; Marco Fossa; Antonella Priarone; Abdellah Mechaqrane. Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate – A case study. *Applied Energy*, **2021**.282: 116156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116156>.
- Pandey, A. K., Tyagi, V. V., Selvaraj, J. A., Rahim, N. A., & Tyagi, S. K. «Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2016**, *53*: 859–884. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.043
- 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 Almeria within an exporting agri-food system context. *Science of The Total Environment*, **2018**: 628-629. doi: [10.1016/j.scitotenv.2018.02.127](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.127).
- Pérez-Alonso, J.; Pérez-García, M.; Pasamontes-Romera, M.; Callejón-Ferre, A.J. Performance analysis and neural modelling of a greenhouse integrated photovoltaic system. *Renew. Sust. Energ.* **2012**, *16*, 4675–4685. doi:10.1016/j.rser.2012.04.002.
- Philipps, Simon. *Photovoltaics Report*. Fraunhofer ISE and Werner Warmuth, PSE Projects GmbH, **2020**. Disponible en: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (fecha de consulta: 20 de noviembre de 2020).
- Qian T.; Dieleman J. A.; Elings, A.; van Kooten O. Comparison of climate and production in closed, semiclosed and open greenhouses. *Acta Hort.* **2011**, *893*, 807–14.
- Qoaidar, L.; Steinbrecht, D. Photovoltaic systems: A cost competitive option to supply energy to off-grid agricultural communities in arid regions. *Appl. Energy* **2010**, *87*, 427–435. doi:10.1016/j.apenergy.2009.06.012.
- Rabobank. *World Vegetable Map 2018*. **2018**. Disponible en: https://research.rabobank.com/far/en/sectors/regional-food-agri/world_vegetable_map_2018.html (fecha de consulta: 7 enero de 2021).
- Rocamora, M. C.; Tripanagnostopoulos, Y. Aspects of PV/T solar system application for ventilation needs in greenhouses. *Acta Hort.* **2006**, *719*, 239–246. doi:10.17660/actahortic.2006.719.26.
- Roslan, N.; Ya’acob, M.E.; Radzi, M.A.M.; Hashimoto, Y.; Jamaludin, D.; Chen, G. Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) greenhouse shading: New insights for solar radiation manipulation. *Renew. Sust. Energ.* **2018**, *92*, 171–186. doi:10.1016/j.rser.2018.04.095.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

- Russo, G.; Anifantis, A. S.; Verdiani, G.; Mugnozza, G. S. Environmental analysis of geothermal heat pump and LPG greenhouse heating systems. *Biosystems Eng.* **2014**, *127*, 11–23.
- Sgroi F.; Tudisca S.; Di Trapan A.; Testa R.; Squatrito R. Efficacy and Efficiency of Italian Energy Policy: The Case of PV Systems in Greenhouse Farms. *Energies* **2014**; *7*: 3985-4001. doi: 10.3390/en7063985
- Sharpe, William F. (1964). *Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk*, *Journal of Finance*, 19 (3), 425-442
- Soria, Alberto. *Legislación fotovoltaica en España*. 2019. CENSOLAR. Disponible en: <https://www.censolar.org/legislacion-fotovoltaica-es-2019/> (Fecha de consulta: 28 de agosto de 2020).
- Souliotis, M.; Tripanagnostopoulos, Y.; Kavga, A. The use of Fresnel lenses to reduce the ventilation needs of greenhouses. *Acta Hortic.* **2006**; *719*: 107-113. doi: 10.17660/ActaHortic.2006.719.9
- Tolón, A. y Lastra A.. La agricultura intensiva del poniente almeriense. Diagnóstico e instrumentos de gestión ambiental. *Revista Electrónica de Medioambiente UCM*, **2010**. *8*:18-40.
- United Nations. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. **2015**. Disponible en: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf> (Fecha de consulta: 29 de diciembre de 2020).
- Ureña-Sánchez, R.; Callejón- Ferre, Á.J.; Pérez-Alonso, J.; Carreño-Ortega, Á. Greenhouse tomato production with electricity generation by roof-mounted flexible solar panels. *Sci. Agr.* **2012**, *69*, 233–239. doi:10.1590/s0103-90162012000400001.
- Vadiée, A.; Martin, V. Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2012**, *16*, 5087–5100. doi:10.1016/j.rser.2012.04.022.
- Valera, D. L.; Belmonte, L. J.; Molina- Aiz, F. D.; López, A.; Camacho, F. The greenhouses of Almería, Spain: technological analysis and profitability. *Acta Horticulturae*, **2017**: 219-226.
- Varun, G.; Bhat, I. K.; Prakash, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2009**; *13*(5): 1067–1073. doi: 10.1016/j.rser.2008.08.004.
- Vourdoubas, J. Economic and Environmental Assessment of the Use of Renewable Energies in Greenhouses: A Case Study in Crete-Greece. *Journal of Agricultural Science*; **2015**, Vol. 7, No. 10. doi:10.5539/jas.v7n10p48

- Wang, T.; Wu, G. ; Chen, J.; Cui, P.; Chen, Z.; Yan, Y. ; Zhang, Y.; Li, M. ; Niu, D. ;Li, B. ; Chen, H. Integration of solar technology to modern greenhouse in China: Current status, challenges and prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2017**,70, 1178–1188. doi: 10.1016/j.rser.2016.12.020
- Winsor G.W.; Adams P. Changes in the composition and quality of tomato fruit throughout the season. *Annu Rep Glasshouse Crops* **1976**, 1975, 134–142.
- Xu, J.; Li, Y.; Wang, R. Z.; Liu, W. Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. *Energy* **2014**, 67, 63–73. doi:10.1016/j.energy.2014.01.049.
- Yano, A.; Kadowaki, M.; Furue, A.; Tamaki, N.; Tanaka, T.; Hiraki, E. Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse. *Biosyst. Eng.* **2010**, 106,367–377. doi:10.1016/j.biosystemseng.2014.04.003
- Yano, A.; Onoe, M.; Najata, J. Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. *Biosyst. Eng.* **2014**, 122, 62–73. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.04.003>
- Yano, A.; Cossu, M. Energy sustainable greenhouse crop cultivation using photovoltaic technologies. *Renew. Sust. Energ.* **2019**, 109, 116–137. doi:10.1016/j.rser.2019.04.026.
- Yano, A.; Furue, A.; Kadowaki, M.; Tanaka, T.; Hiraki, E.; Miyamoto, M.; Ishizu, F.; Noda, S. Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north–south oriented greenhouse. *Biosystems Eng.* **2009**, 103, 228–238. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.02.020.
- Yano, A.; Tsuchiya, K.; Nishi, K.; Moriyama, T.; Ide, O. Development of a Greenhouse Side-ventilation Controller driven by Photovoltaic Energy. *Biosystems Eng.* **2007**, 96, 633–641. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.12.012.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

ANEXOS

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

ANEXO I: REGISTRO DE DATOS

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

En este anexo se presenta, a título ilustrativo el registro realizado de datos de calidad del fruto en los tratamientos T0,T1,T2 y T3. Los datos expuestos pertenecen a la cosecha correspondiente a 114 d.d.t.

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST° brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T0R1	1	4,5	388	4,59
08/01/2015	114	T0R1	2	4,1	785	3,93
08/01/2015	114	T0R1	3	4,3	806,5	4,27
08/01/2015	114	T0R1	4	3,6	415,5	3,94
08/01/2015	114	T0R1	5	3,9	472,5	4,61
08/01/2015	114	T0R1	6	4	331,5	8,8
08/01/2015	114	T0R1	7	3,8	362	4,65
08/01/2015	114	T0R1	8	3,8	363,5	4,47
08/01/2015	114	T0R1	9	4,1	152	4,43
08/01/2015	114	T0R1	10	4,4	906	4,25
08/01/2015	114	T0R1	11	3,2	551,5	4,2
08/01/2015	114	T0R1	12	4,2	150	4,51
08/01/2015	114	T0R1	13	3,9	453,5	4,56
08/01/2015	114	T0R1	14	3,3	584,5	4,23
08/01/2015	114	T0R1	15	4,2	501	4,19
08/01/2015	114	T0R1	16	2,8	548	4,49
08/01/2015	114	T0R1	17	4,2	398,5	4,42
08/01/2015	114	T0R1	18	3,9	386,5	3,96
08/01/2015	114	T0R1	19	3,5	1380	4,27
08/01/2015	114	T0R1	20	2,5	481,5	4,34
08/01/2015	114	T0R1	21	4	293,5	4,37
08/01/2015	114	T0R1	22	3,8	372,5	4,83

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST ^o brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T0R1	23	3,9	730,5	4,43
08/01/2015	114	T0R1	24	3,8	514,5	4,95
08/01/2015	114	T0R1	25	3,7	322,5	4,11
08/01/2015	114	T0R1	26	3,8	860,5	4,65
08/01/2015	114	T0R1	27	3,7	335	4,66
08/01/2015	114	T0R1	28	3,7	304	4,67
08/01/2015	114	T0R1	29	3,9	258	4,34
08/01/2015	114	T0R1	30	3,8	693,5	4,47
08/01/2015	114	T0R2	1	4	712,5	4,25
08/01/2015	114	T0R2	2	4	233	4,33
08/01/2015	114	T0R2	3	3,8	372,5	4,63
08/01/2015	114	T0R2	7	3,9	265	4,17
08/01/2015	114	T0R2	8	4,2	695,5	4,35
08/01/2015	114	T0R2	9	3,7	715,5	4,24
08/01/2015	114	T0R2	16	3,9	674,5	4,24
08/01/2015	114	T0R2	17	4,1	227	4,24
08/01/2015	114	T0R2	18	3,8	505	4,21
08/01/2015	114	T0R2	22	3,7	450,5	4,67
08/01/2015	114	T0R2	23	3,9	267	4,26
08/01/2015	114	T0R2	24	3,9	199,5	4,37
08/01/2015	114	T0R2	26	4	829	4,8
08/01/2015	114	T0R2	27	3,4	285	4,19
08/01/2015	114	T0R2	28	3,5	440	4,55
08/01/2015	114	T0R2	31	3,9	157,5	4,33
08/01/2015	114	T0R2	32	4,1	728,5	4,45

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST ^o brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T0R2	33	4,2	269	4,23
08/01/2015	114	T0R2	35	4,1	1383	4,23
08/01/2015	114	T0R2	36	3,6	282,5	4,95
08/01/2015	114	T0R2	37	4,2	1013	4,1
08/01/2015	114	T0R2	39	4	591,5	4,09
08/01/2015	114	T0R2	40	3,8	482	4,02
08/01/2015	114	T0R2	41	3,8	140	4,54
08/01/2015	114	T0R2	42	4,3	662,5	4,54
08/01/2015	114	T0R3	1	4,9	379	4,36
08/01/2015	114	T0R3	2	4,8	235	4,33
08/01/2015	114	T0R3	3	4,6	369,5	4,42
08/01/2015	114	T0R3	4	4,4	505,5	4,44
08/01/2015	114	T0R3	5	4,3	961,5	4,65
08/01/2015	114	T0R3	6	4,3	445	4,44
08/01/2015	114	T0R3	7	3,7	459,5	4,17
08/01/2015	114	T0R3	8	4,1	521	4,04
08/01/2015	114	T0R3	9	4,1	41,5	4,27
08/01/2015	114	T0R3	10	3,8	70,5	4,59
08/01/2015	114	T0R3	11	3,9	149,5	4,4
08/01/2015	114	T0R3	15	4,1	223	4,34
08/01/2015	114	T0R3	16	4	1272	4,35
08/01/2015	114	T0R3	17	3,9	371	4,38
08/01/2015	114	T0R3	21	4,1	145,5	4,3
08/01/2015	114	T0R3	22	4,2	101,5	4,36
08/01/2015	114	T0R3	23	3,7	272	4,6

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST ^o brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T0R3	24	3,4	343	4,1
08/01/2015	114	T0R3	25	3,3	76	4,33
08/01/2015	114	T0R3	26	3,2	105	4,23
08/01/2015	114	T0R3	28	3,5	289,5	4,52
08/01/2015	114	T0R3	29	3,7	707,5	4,35
08/01/2015	114	T0R3	30	3,3	178,5	4,59
08/01/2015	114	T0R3	31	3,2	1376	4,66
08/01/2015	114	T0R3	32	3,4	524	4,9
08/01/2015	114	T0R4	1	3,5	349	4,79
08/01/2015	114	T0R4	2	3,8	38	4,2
08/01/2015	114	T0R4	3	3,6	237	4,45
08/01/2015	114	T0R4	6	3,9	134,5	4,28
08/01/2015	114	T0R4	7	3,9	419,5	4,26
08/01/2015	114	T0R4	8	3,8	262	4,6
08/01/2015	114	T0R4	11	4,4	113,5	4,36
08/01/2015	114	T0R4	12	4	436,5	4,32
08/01/2015	114	T0R4	13	3,9	531,5	4,13
08/01/2015	114	T0R4	17	4,3	428	3,9
08/01/2015	114	T0R4	18	4,3	348	5,05
08/01/2015	114	T0R4	19	4,2	441	4,61
08/01/2015	114	T0R4	22	4,1	162	4,41
08/01/2015	114	T0R4	23	4,3	946	4,26
08/01/2015	114	T0R4	24	4,5	555,5	4,05
08/01/2015	114	T0R4	25	3,8	534,5	4,09
08/01/2015	114	T0R4	26	3,9	469,5	4,52

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST ^o brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T0R4	27	4,2	517	4,86
08/01/2015	114	T0R4	28	4,3	187,5	4,53
08/01/2015	114	T0R4	29	5,3	1059,5	4,72
08/01/2015	114	T0R4	30	4	206	4,89
08/01/2015	114	T0R4	32	4,1	368	4,64
08/01/2015	114	T0R4	33	4,3	415,5	4,34
08/01/2015	114	T0R4	34	4,3	603	4,37
08/01/2015	114	T0R4	35	4,6	469,5	4,22
08/01/2015	114	T1R1	1	4,4	680	4,1
08/01/2015	114	T1R1	2	4,2	429	4,41
08/01/2015	114	T1R1	3	4,8	508,5	4,43
08/01/2015	114	T1R1	4	4,5	536	4,38
08/01/2015	114	T1R1	5	4,6	419	4,51
08/01/2015	114	T1R1	6	4,6	289	4,27
08/01/2015	114	T1R1	7	4,6	134,5	4,37
08/01/2015	114	T1R1	10	4,6	1035	4,36
08/01/2015	114	T1R1	11	4,5	300,5	4,31
08/01/2015	114	T1R1	12	4,5	356	4,46
08/01/2015	114	T1R1	13	4,6	522,5	4,32
08/01/2015	114	T1R1	14	5	345,5	4,28
08/01/2015	114	T1R1	15	5	360,5	4,55
08/01/2015	114	T1R1	16	4,4	281,5	4,26
08/01/2015	114	T1R1	17	4,4	464,5	3,95
08/01/2015	114	T1R1	18	4,4	844	4,41
08/01/2015	114	T1R1	19	4,5	673	4,44

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST ^o brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T1R1	20	4,5	516,5	4,22
08/01/2015	114	T1R1	21	5,5	291	4,35
08/01/2015	114	T1R1	22	5,4	1117,5	4,18
08/01/2015	114	T1R1	23	5,2	249,5	4,12
08/01/2015	114	T1R1	24	4,1	584,5	4,22
08/01/2015	114	T1R1	25	4	461,5	4,09
08/01/2015	114	T1R1	26	3,8	608	4,38
08/01/2015	114	T1R1	27	3,9	539	4,21
08/01/2015	114	T1R2	1	4	689	4,44
08/01/2015	114	T1R2	2	3,9	914	4,83
08/01/2015	114	T1R2	3	4,2	704	4,33
08/01/2015	114	T1R2	4	5,2	588	4,67
08/01/2015	114	T1R2	5	3,9	819	4,36
08/01/2015	114	T1R2	6	4,2	533,5	4,3
08/01/2015	114	T1R2	8	4,2	732	4,14
08/01/2015	114	T1R2	9	4,5	430,5	4,11
08/01/2015	114	T1R2	10	4,5	678,5	4,37
08/01/2015	114	T1R2	11	4,4	341	4,48
08/01/2015	114	T1R2	12	4,3	575,5	4,55
08/01/2015	114	T1R2	13	4,5	514,5	4,6
08/01/2015	114	T1R2	14	4,3	351,5	4,24
08/01/2015	114	T1R2	15	4	554,5	4,33
08/01/2015	114	T1R2	16	4	351	4,22
08/01/2015	114	T1R2	17	3,8	725	4,35
08/01/2015	114	T1R2	18	4,1	603,5	4,31

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST ^o brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T1R2	19	4,1	616	4,23
08/01/2015	114	T1R2	20	3,9	267	4,4
08/01/2015	114	T1R2	21	3,9	448	4,2
08/01/2015	114	T1R2	22	3	829	4,2
08/01/2015	114	T1R2	23	4,2	193	4,08
08/01/2015	114	T1R2	24	3,6	929	4,45
08/01/2015	114	T1R2	25	3,5	302	4,3
08/01/2015	114	T1R2	26	3,9	391	4,62
08/01/2015	114	T1R3	1	3,8	391	4,41
08/01/2015	114	T1R3	2	4,1	290,5	4,27
08/01/2015	114	T1R3	3	4,2	392	4,31
08/01/2015	114	T1R3	4	4,1	584	3,99
08/01/2015	114	T1R3	5	4,3	332	4,27
08/01/2015	114	T1R3	6	4,1	450	4,71
08/01/2015	114	T1R3	7	4	936,5	4,26
08/01/2015	114	T1R3	8	3,9	821,5	4,22
08/01/2015	114	T1R3	9	4,1	1075,5	4,13
08/01/2015	114	T1R3	10	4	580,5	4,23
08/01/2015	114	T1R3	11	4,1	536	3,88
08/01/2015	114	T1R3	12	3,8	499	4,35
08/01/2015	114	T1R3	13	3,9	983,5	4,24
08/01/2015	114	T1R3	14	3,7	189,5	3,86
08/01/2015	114	T1R3	15	3,3	949	4,43
08/01/2015	114	T1R3	16	3,6	814	4,1
08/01/2015	114	T1R3	17	3,5	466	4,08

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST ⁰ brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T1R3	19	4,2	1096,5	4,28
08/01/2015	114	T1R3	20	3,9	890	4,34
08/01/2015	114	T1R3	22	4,2	704,5	4,36
08/01/2015	114	T1R4	1	4,1	381,5	4,14
08/01/2015	114	T1R4	2	4	368,5	4,37
08/01/2015	114	T1R4	3	4,2	240,5	4,32
08/01/2015	114	T1R4	4	4,1	975	4,18
08/01/2015	114	T1R4	5	4,7	444	4,3
08/01/2015	114	T1R4	6	4,4	136	4,31
08/01/2015	114	T1R4	7	4,6	114	4,43
08/01/2015	114	T1R4	8	4,3	681	4,22
08/01/2015	114	T1R4	9	4,2	229,5	4,11
08/01/2015	114	T1R4	10	4,2	293,5	4,25
08/01/2015	114	T1R4	11	4,7	121	4,95
08/01/2015	114	T1R4	12	4,6	713	4,46
08/01/2015	114	T1R4	13	4,3	253,5	4,43
08/01/2015	114	T1R4	14	4,4	332,5	4,57
08/01/2015	114	T1R4	15	4,5	1036,5	4,42
08/01/2015	114	T1R4	16	4,6	365,5	4,22
08/01/2015	114	T1R4	17	4,6	685	4,85
08/01/2015	114	T1R4	18	4,6	799,5	4,38
08/01/2015	114	T1R4	19	4,9	835,5	4,16
08/01/2015	114	T1R4	20	4,2	906,5	4,04
08/01/2015	114	T1R4	21	4,3	166	4,12
08/01/2015	114	T1R4	22	4	650	4,49

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST ^o brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T1R4	23	4,1	1435,5	4,34
08/01/2015	114	T2R1	1	3,8	1011,5	4,25
08/01/2015	114	T2R1	2	3,7	705,5	4,13
08/01/2015	114	T2R1	3	4	299,5	4,45
08/01/2015	114	T2R1	4	4,1	538,5	4,38
08/01/2015	114	T2R1	5	3,9	368	4,32
08/01/2015	114	T2R1	6	3,9	676,5	4,29
08/01/2015	114	T2R1	7	3,9	526,5	4,23
08/01/2015	114	T2R1	8	3,9	890,5	4,2
08/01/2015	114	T2R1	9	3,9	841	4,07
08/01/2015	114	T2R1	10	3,8	723,5	4,34
08/01/2015	114	T2R2	1	3,1	907	4,37
08/01/2015	114	T2R2	2	3,8	1245,5	4,38
08/01/2015	114	T2R2	3	3,8	875	4,35
08/01/2015	114	T2R2	4	3,7	1056	4,01
08/01/2015	114	T2R2	5	3,7	802	4,41
08/01/2015	114	T2R2	6	3,6	363,5	4,49
08/01/2015	114	T2R2	7	3,7	880	4,22
08/01/2015	114	T2R2	8	3,3	1083	4,18
08/01/2015	114	T2R2	9	3,9	432	4,27
08/01/2015	114	T2R2	10	3,9	698,5	4,09
08/01/2015	114	T2R3	1	4,3	427	3,93
08/01/2015	114	T2R3	5	4,5	1019	4,36
08/01/2015	114	T2R3	6	4,7	876	4,13
08/01/2015	114	T2R3	7	3,5	835	4,03

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

Fecha	DDT	Tratamiento	Fruto	SST ⁰ brix	Firmeza	pH
08/01/2015	114	T2R3	8	3,3	889	4,29
08/01/2015	114	T2R3	9	4	744	4,07
08/01/2015	114	T2R3	10	3,8	1013	4,3
08/01/2015	114	T2R3	11	4,7	834,5	4,13
08/01/2015	114	T2R3	12	4,7	833,5	4,11
08/01/2015	114	T2R4	1	4,7	1256	4,42
08/01/2015	114	T2R4	2	4,7	508	4,28
08/01/2015	114	T3R3	1	4,4	861,5	3,85
08/01/2015	114	T3R3	2	4,4	765,5	4,15

ANEXO II: LISTADO DE NORMATIVA

Listado normativa autonómica, estatal y normas técnicas de aplicación en los proyectos de instalación fotovoltaica en España.

NORMATIVA AUTONÓMICA

- ✓ Decreto-ley 2/2018, de 26 de junio, de simplificación de normas en materia de energía y fomento de las energías renovables en Andalucía.
- ✓ Orden de 24 de octubre de 2005, por la que se regula el procedimiento electrónico para la puesta en servicio de determinadas instalaciones de Baja Tensión (TECI)
- ✓ Orden de 5 de marzo de 2013, por la que se dictan normas de desarrollo del Decreto 59/2005, de 1 de marzo, por el que se regula el procedimiento para la instalación, ampliación, traslado y puesta en funcionamiento de los establecimientos industriales, así como el control, responsabilidad y régimen sancionador de los mismos.

NORMATIVA ESTATAL

- ✓ Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.
- ✓ Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores.
- ✓ Real Decreto 900/2015, de 9 de Octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.
- ✓ Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- ✓ Orden IET/1045/2014, de 16 de junio, por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- ✓ Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico
- ✓ Real Decreto-ley 2/2013, de 1 de febrero, de medidas urgentes en el sistema eléctrico y en el sector financiero.
- ✓ Real Decreto-ley 9/2013, de 12 de julio, por el que se adoptan medidas urgentes para garantizar la estabilidad financiera del sistema eléctrico.
- ✓ Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos.
- ✓ Ley 15/2012, de 27 de diciembre, de medidas fiscales para la sostenibilidad energética.
- ✓ Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia.
- ✓ Real Decreto 1565/2010, de 19 de noviembre, por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

- ✓ Real Decreto-ley 14/2010, de 23 de diciembre, por el que se establecen medidas urgentes para la corrección del déficit tarifario del sector eléctrico.
- ✓ Real Decreto-Ley 6/2009, de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social.
- ✓ Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- ✓ Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- ✓ Real Decreto 1433/2003 de 27 de diciembre, por el que se establecen los requisitos de medida en baja tensión de consumidores y centrales de producción en Régimen Especial.
- ✓ Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias (Real Decreto 842/2002 de 2 de Agosto de 2002).
- ✓ Real Decreto 841/2002 de 2 de agosto por el que se regula para las actividades de producción de energía eléctrica en régimen especial su incentivación en la participación en el mercado de producción, determinadas obligaciones de información de sus previsiones de producción, y la adquisición por los comercializadores de su energía eléctrica producida.
- ✓ Real Decreto 1663/2000, de 29 de septiembre, sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas a la red de baja tensión.
- ✓ Resolución de 31 de mayo de 2001 por la que se establecen modelo de contrato tipo y modelo de factura para las instalaciones solares fotovoltaicas conectadas a la red de baja tensión.
- ✓ Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.

NORMAS UNE

- ✓ Norma UNE 206001 EX sobre Módulos fotovoltaicos. Criterios ecológicos.
- ✓ Norma UNE-EN 50380 sobre Informaciones de las hojas de datos y de las placas de características para los módulos fotovoltaicos.
- ✓ Norma UNE EN 60891 sobre Procedimiento de corrección con la temperatura y la irradiancia de la característica I-V de dispositivos fotovoltaicos de silicio cristalino.
- ✓ Norma UNE EN 60904 sobre Dispositivos fotovoltaicos. Requisitos para los módulos solares de referencia.
- ✓ Norma UNE EN 61173 sobre Protección contra las sobretensiones de los sistemas fotovoltaicos (FV) productores de energía - Guía.
- ✓ Norma UNE EN 61194 sobre Parámetros característicos de sistemas fotovoltaicos (FV) autónomos.
- ✓ Norma UNE 61215 sobre Módulos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino para aplicación terrestre. Cualificación del diseño y aprobación tipo.

- ✓ Norma UNE EN 61277 sobre Sistemas fotovoltaicos (FV) terrestres generadores de potencia. Generalidades y guía.
- ✓ Norma UNE EN 61453 sobre Ensayo ultravioleta para módulos fotovoltaicos (FV).
- ✓ Norma UNE EN 61646:1997 sobre Módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada para aplicación terrestre. Cualificación del diseño y aprobación tipo.
- ✓ Norma UNE EN 61683 sobre Sistemas fotovoltaicos. Acondicionadores de potencia. Procedimiento para la medida del rendimiento.
- ✓ Norma UNE EN 61701 sobre Ensayo de corrosión por niebla salina de módulos fotovoltaicos (FV).
- ✓ Norma UNE EN 61721 sobre Susceptibilidad de un módulo fotovoltaico (FV) al daño por impacto accidental (resistencia al ensayo de impacto).
- ✓ Norma UNE EN 61724 sobre Monitorización de sistemas fotovoltaicos. Guías para la medida, el intercambio de datos y el análisis.
- ✓ Norma UNE EN 61725 sobre Expresión analítica para los perfiles solares diarios.
- ✓ Norma UNE EN 61727 sobre Sistemas fotovoltaicos (FV). Características de la interfaz de conexión a la red eléctrica.
- ✓ Norma UNE EN 61829 sobre Campos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino. Medida en el sitio de características I-V.

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

ANEXO III: PATENTE SOLNOVA

“Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía fotovoltaica”

ANEXO IV: PUBLICACIONES