

# EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS SEMITRANSSPARENTES *en invernaderos agrivoltaicos*

El IMIDA evalúa la viabilidad de la tecnología fotovoltaica semitransparente para la producción conjunta de cultivos y energía mediante el proyecto de investigación GLASS, y construirá un invernadero piloto junto con la Universidad de Jaén y J. Huete International. Se valorarán los potenciales beneficios agronómicos, energéticos, económicos y medioambientales de un invernadero agrivoltaico en el sureste español.

VIRGINIA HERNÁNDEZ<sup>1</sup>, FULGENCIO CONTRERAS<sup>1</sup>, CARLOS TOLEDO<sup>1</sup>, RICARDO ABADÍA<sup>2</sup>, GONZALO ÁLVAREZ<sup>2</sup>, VINCENZO TUCCI<sup>3</sup>, ELIA MOLINA<sup>1</sup>, PILAR HELLÍN<sup>1</sup>, ALICIA SÁNCHEZ<sup>1</sup>, JOSÉ FENOLL<sup>1</sup>, PILAR FLORES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMIDA, Murcia. Email: mpilar.flores@carm.es

<sup>2</sup> CIAGRO-UMH, EPSO, Orihuela

<sup>3</sup> UNIBA – Di.S.S.P.A., Bari, Italy

**E**n los sistemas agrivoltaicos (AV), la tecnología fotovoltaica (FV) se integra con la actividad agrícola permitiendo el doble uso del terreno para la producción simultánea de cultivos y energía eléctrica (Dupraz *et al.*, 2011; Al Mamun *et al.*, 2022). Dentro de este concepto, los invernaderos AV constituyen una categoría específica donde los paneles FV se incorporan directamente en la estructura principal o en interior del invernadero. Las ventajas asociadas al cultivo bajo invernadero, combinadas con la generación de energía FV, posicionan a estos sistemas como una solución prometedora en el ámbito agrícola, con potencial para reducir las emisiones de gases de efecto in-

vernadero mediante la generación de energía renovable. Asimismo, permiten disminuir los costos energéticos de las explotaciones agrícolas a través del autoconsumo, e incluso generar ingresos adicionales si la infraestructura FV está diseñada de tal manera que facilite la venta de electricidad excedente.

Considerando la premisa de maximizar la producción agrícola y no introducir cambios drásticos en el modelo de negocio de los agricultores, los invernaderos AV deben diseñarse sobre la base de un equilibrio óptimo entre las producciones agrícola y energética, ajustándose a las condiciones de cada zona y a los requerimientos de luz específicos de ambas actividades. Además de reducir la radiación solar

que reciben las plantas, el sombreado provocado por los paneles modifica la temperatura y humedad relativa dentro del invernadero en diferentes grados, dependiendo de la época del año en la que se desarrolle el ciclo de cultivo y la existencia o no de ventilación (Ezzaeri *et al.*, 2018). Todas estas modificaciones de las condiciones ambientales pueden inducir cambios en la morfología y fisiología de las plantas, así como en la incidencia de plagas y enfermedades, lo que, a su vez, puede repercutir negativamente en el rendimiento de los cultivos (Savalle-Gloire *et al.*, 2024). Sin embargo, en climas cálidos, donde es habitual la utilización de mallas de sombreado para proteger a las plantas del estrés provocado por un exceso de

radiación, la sombra generada por los paneles FV sobre los cultivos puede paliar las altas temperaturas y promover el desarrollo de las plantas (Hernández *et al.*, 2022). Además, los invernaderos AV han mostrado ser capaces de aumentar la eficiencia en el uso del agua de los cultivos, cuestión clave en lugares con escasez de recursos hídricos (Ntinas *et al.*, 2017). Así, la combinación del clima semiárido y el uso de tecnologías avanzadas como son los invernaderos AV pueden crear un entorno ideal para maximizar tanto la producción agrícola como la generación de energía solar.

Para generar energía suficiente que haga rentable la infraestructura FV sin detrimento de la producción agrícola, los aspectos esenciales a considerar durante el diseño de un invernadero AV son la radiación solar en la ubicación concreta y los requerimientos lumínicos del cultivo. Investigaciones previas han demostrado que los módulos FV semitransparentes que permiten que parte de la luz solar pase a través de ellos, son una opción capaz de incrementar la homogeneidad de la luz dentro del invernadero y mejorar el rendimiento de los cultivos (Tani, 2014; Gnayem *et al.*, 2024). Los módulos semitransparentes pueden diseñarse mediante el uso de células opacas estándar de primera generación (silicio cristalino), logrando la semitransparencia al espaciar las células y encapsularlas en materiales transparentes, o utilizando materiales activos semitransparentes, como las células de lámina delgada (segunda generación), o bien paneles orgánicos o células solares sensibilizadas por colorante (tercera generación). De estas opciones, los módulos de silicio cristalino y, en menor medida, la tecnología de segunda generación, especialmente la de lámina delgada de telurio de cadmio (CdTe), son actualmente las tecnologías más consolidadas comercialmente, destacándose por su eficiencia y durabilidad. En este estudio se han evaluado dos tecnologías FV semitransparentes, silicio



**FIGURA 1**

Arriba: Vista general de los invernaderos experimentales. Abajo, de izquierda a derecha, interior de invernaderos: control (C), control sombreado (CS), con panel FV de silicio monocristalino (c-Si) y con panel semitransparente de lámina delgada de CdTe (ST-CdTe).

monocristalino encapsulado en vidrio y lámina delgada de CdTe, para su uso como material de cubierta en invernaderos AV para la producción de tomate. El estudio forma parte del proyecto “Sistemas agrivoltaicos como laboratorio-viviente para invernaderos en España (GLASS)” financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos NextGenerationEU (PLEC2022-009435), en el que participan la Universidad de Jaén (UJA), la empresa J. Huete International y el Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Medioambiental (IMIDA). El estudio se realizó en cuatro invernaderos experimentales de polietileno (Celloflex 4D 5000) (3,90 m largo\*2,00 m ancho\*3,10 m alto) instalados en el IMIDA. Cada inver-

nadero disponía de capacidad para albergar un número representativo de plantas distribuidas en tres filas, con un marco de plantación de 0,50 x 0,60 m. Los cuatro invernaderos contaban con ventilación cenital y frontal para asegurar una correcta tasa de renovación del aire y regular la temperatura y humedad en el interior del invernadero. La cubierta y la fachada sur de cada invernadero se cubrió con los materiales a evaluar: polietileno (C, control sin sombreado), polietileno y malla blanca de sombreado (CS, control con sombreado), paneles FV suministrados por Brite® (59 W) con tecnología monofacial de silicio monocristalino encapsulado en vidrio (c-Si) y paneles FV suministrados por Polysolar® (40 W), con tecnología de lámina delgada (ST-CdTe) (Figura 1).

Tanto la malla como las dos tecnologías FV utilizadas proporcionaban un sombreado del 50%.

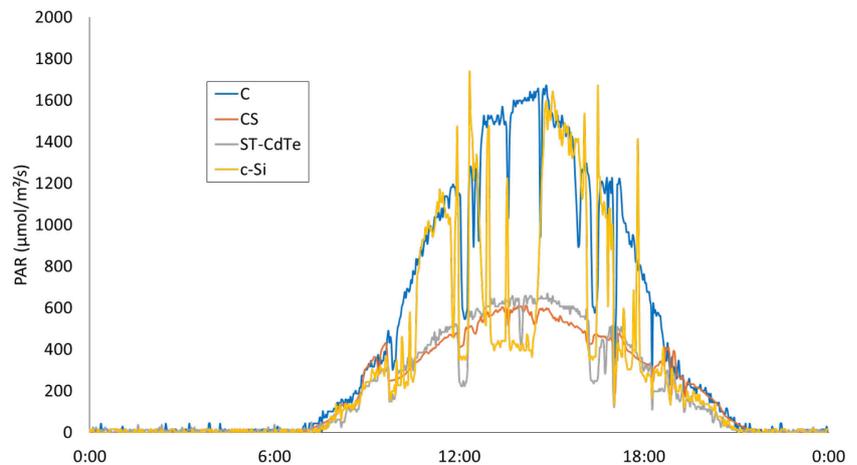
Se realizaron dos ciclos de cultivo de tomate, el primero de invierno (del 19 de diciembre de 2023 al 18 de abril de 2024, 120 días) y el segundo de primavera-verano (del 30 de abril de 2024 al 31 de julio de 2024, 98 días). Para la monitorización de los parámetros ambientales y la gestión del riego, en cada invernadero se instalaron sondas ambientales de radiación global, radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura y humedad (Inta Crop Technology), y sondas suelo (Drill&Drop Triscam, Sentek), capaces de medir temperatura y humedad a diferentes profundidades.

### Rendimiento de módulos fotovoltaicos

La generación de energía mensual media de los invernaderos c-Si y ST-CdTe durante el primer ciclo de cultivo (invierno) fue de 120 y 79 kWh, respectivamente, y de 123 y 84 kWh durante el ciclo de primavera-verano. De media, el invernadero c-Si generó un 34% más de energía que el invernadero ST-CdTe, con un ligero incremento en la producción durante el ciclo de primavera-verano para ambos tipos de invernadero.

### Parámetros ambientales

El perfil de radiación PAR representado en la **Figura 2**, correspondiente a un día soleado, muestra las diferencias en la distribución e intensidad de la radiación que reciben las plantas cultivadas bajo los invernaderos control sin y con sombreado y las diferen-



**FIGURA 2**  
Perfil de radiación fotosintéticamente activa (PAR) en el interior de los invernaderos.

tes tecnologías FV. El cálculo de la superficie bajo cada curva permitió estimar el porcentaje de sombreado en un 55, 57 y 28% respecto al control sin sombreado (C), en los invernaderos CS, ST-CdTe y c-Si, respectivamente. La disposición en patrón de damero del sombreado generado por los paneles fotovoltaicos en el invernadero c-Si permitió que, en una misma planta,

el sombreado no fuera completo, de modo que distintas partes de la planta estuvieron expuestas simultáneamente a radiación directa y a zonas sombreadas de forma intermitente a lo largo del fotoperiodo. El material utilizado para el recubrimiento también afectó a la temperatura y humedad relativa del aire en el interior de cada invernadero,

**TABLA 1**

Peso parte aérea (PA), altura de planta (A), número de hojas (NH) y área foliar (AF) de plantas cultivadas bajo invernaderos C, CS, c-Si y ST-CdTe durante ciclos de invierno (ciclo 1) y primavera-verano (ciclo 2).

		PA (g)	A (cm)	NH	AF (cm <sup>2</sup> )
CICLO 1	C	578	141	32b	20a
	CS	650	143	28a	25ab
	c-Si	636	150	29a	23ab
	ST-CdTe	607	145	28a	27b
		n.s.	n.s.	*	*
CICLO 2	C	1044	193b	35a	23a
	CS	1009	171a	32a	37b
	c-Si	1032	195b	41b	21a
	ST-CdTe	1000	178a	33a	34b
		n.s.	**	***	**

\*, \*\*, \*\*\*Diferencias significativas a nivel 5, 1 y 0,1% de probabilidad. Para cada ciclo, letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan (P=5%).

### ¿SABÍAS QUÉ?

Las tecnologías fotovoltaicas evaluadas producen grandes diferencias en la distribución e intensidad de la radiación dentro de los invernaderos, así como en sus correspondientes valores de temperatura y la humedad relativa del aire, según el momento del ciclo y el fotoperiodo.

dependiendo del momento del ciclo y del fotoperiodo. Durante los meses más fríos del ciclo de invierno (enero y febrero), el control (C) alcanzó la temperatura diurna más elevada, con valores ligeramente superiores a los invernaderos con tecnología FV (c-Si y ST-CdTe), siendo el invernadero con malla el que alcanzaba menores valores de temperatura máxima. A pesar de estas diferencias, todos los invernaderos alcanzaron temperaturas diurnas por encima de 25°C, por lo que no se consideraron limitantes para el desarrollo del cultivo en ninguno de los casos. Al contrario de lo observado durante el día, las temperaturas nocturnas del invernadero C fueron inferiores a las del resto de invernadero. En el caso de los invernaderos c-Si y ST-CdTe, la temperatura nocturna alcanzó valores de hasta 1°C superiores al

control, lo que pudo suponer una ventaja para el desarrollo de la planta durante los meses más fríos, en los que se alcanzaron temperaturas mínimas por debajo de 3°C. Durante los meses más frescos del ciclo de primavera-verano (abril y mayo), los invernaderos más cálidos durante el día y la noche fueron los cubiertos con paneles FV (c-Si y ST-CdTe). Conforme avanzó el ciclo y aumentaba la temperatura ambiental, el invernadero c-Si fue el que durante el día alcanzó menor temperatura, mientras que en el C fue en el que se registraron temperaturas más bajas por la noche. Los valores de humedad máximos y mínimos alcanzados durante el ciclo de invierno fueron 92-11%, 89-11%, 89-11% y 89-9% y durante el ciclo de primavera-verano de 87-11%, 86-11%, 85-10% y 85-11%, en los invernaderos C, CS, c-Si y ST-CdTe, respectivamente.

Las ventajas de cultivos bajo invernadero, combinadas con la generación de energía FV, posicionan a estos sistemas como una solución prometedora



## El poder de las enzimas, la fuerza de la tecnología

- Alta calidad de las materias primas.
- Exclusivo proceso de obtención.
- Propiedades biológicas contrastadas.
- Aumenta la tolerancia y resistencia frente al estrés.



## Morfología y fenología de la planta

Aunque no se observaron diferencias significativas en la producción de biomasa vegetativa (peso fresco de la parte aérea), las condiciones específicas de cada invernadero influyeron en la morfología de las plantas (Tabla 1). Durante el invierno, las plantas cultivadas en el invernadero control mostraron mayor número de hojas en comparación con las de otros invernaderos. Solo las plantas cultivadas en el invernadero ST-CdTe presentaron un área foliar significativamente mayor que las del control C, lo que sugiere una adaptación a condiciones de luz limitada. En verano, el crecimiento de las plantas en los invernaderos C y c-Si fue similar en cuanto a la altura de planta y área foliar; sin embargo, las plantas en el invernadero c-Si desarrollaron un mayor número de hojas que las de los otros invernaderos. La fenología de las plantas durante el ciclo de invierno fue similar en todos los invernaderos, salvo por un leve retraso en la floración a partir del racimo 3 en el invernadero CS. En el ciclo de primavera-verano, las diferencias entre invernaderos se hicieron notorias a partir del racimo 10, donde se observó una floración más temprana en el invernadero c-Si, seguido del invernadero C, y finalmente de los invernaderos CS y ST-CdTe.

## Producción de fruto

Los resultados de producción demostraron que la tecnología FV de silicio monocristalino encapsulado en vidrio (c-Si) tiene un gran potencial como opción destacada en el diseño de invernaderos agrivoltaicos. Durante el ciclo de invierno, el incremento de la temperatura nocturna en la fase inicial del cultivo, combinado con un patrón de sombreo tipo damero que permite una exposición solar parcial e intermitente durante todo el fotoperiodo, promovió un desarrollo óptimo del cultivo. Esta combinación de factores dio como resultado en una producción significativamente superior en comparación con el control y los demás tratamientos de invernadero (Figura 3). En el ciclo

de verano, el rendimiento agrícola de este invernadero fue comparable al del control C. En conclusión, el uso de esta tecnología en invernaderos ofrece una solución con importantes beneficios potenciales: mantener e incluso mejorar el rendimiento agronómico al mismo tiempo que se genera energía limpia, bien para autoconsumo o venta de excedentes.

Concluida esta primera fase del proyecto, la próxima actividad contemplará la aplicación de esta tecnología a una escala mayor mediante la construcción de un invernadero piloto, donde se evaluarán no solo los aspectos agronómicos y energéticos, sino también los impactos económicos y medioambientales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación de este trabajo (proyecto PLEC2022-009435), y a Inmaculada Garrido, Carlos Colomer, María Molina y Ángela Jiménez su participación en el trabajo técnico.

## Bibliografía

Queda a disposición del lector interesado en el correo electrónico: [redaccion@editorialagricola.com](mailto:redaccion@editorialagricola.com)

### ¿SABÍAS QUÉ?

Los módulos fotovoltaicos semi-transparentes de silicio monocristalino muestra gran potencial para invernaderos agrivoltaicos, permitiendo mantener o mejorar el rendimiento agronómico mientras se genera energía limpia para autoconsumo o venta de excedentes.

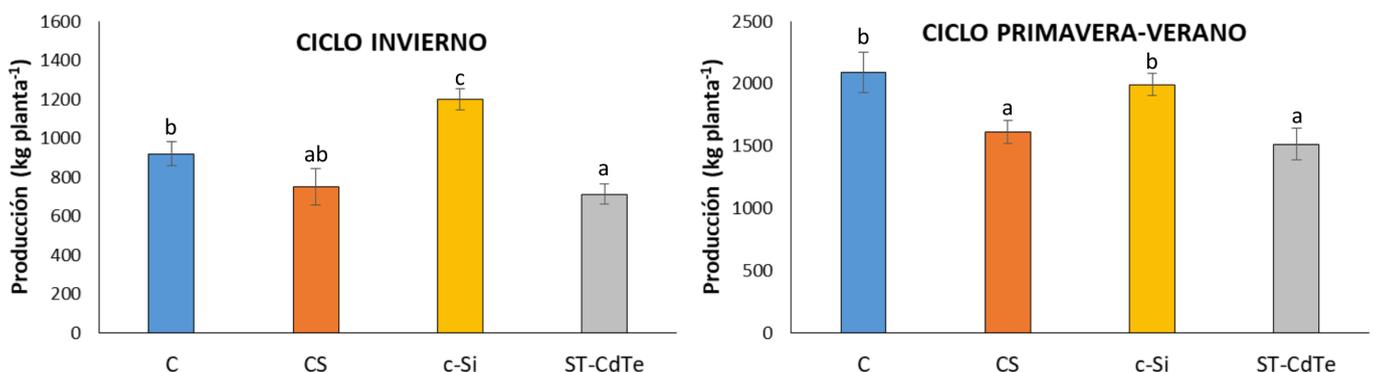


FIGURA 3

Producción de fruto durante los ciclos de invierno (izquierda) y primavera-verano (derecha) bajo los invernaderos C, CS, c-Si y ST-CdTe. Las barras son medias  $\pm$  SE (n=6). Para cada ciclo, letras diferentes indican diferencias significativas (Duncan, P= 5%).