

PLAN COMPLEMENTARIO DE AGROALIMENTACIÓN

AGROALNEXT ARAGÓN

Informes técnicos sobre la caracterización de los parámetros productivos de cultivos de plantas aromáticas en un escenario agrovoltaico.

Promovido y financiado por

Iniciativa impulsada por:



Creado dentro del Plan Complementario de Agroalimentación AGROALNEXT en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU

AGROALNEXT  Plan de Recuperación,
Transformación
y Resiliencia

 Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU

 GOBIERNO
DE ARAGÓN
MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES

 GOBIERNO
DE ARAGÓN

URL: <https://hdl.handle.net/10532/7987>

Año 2025

Autores: J. Navarro, I. Martín, L. Benito, D. Gimeno; I. Pérez, D. Gimeno, M.A. Sanz

Departamento de Ciencia Vegetal (CV).

Promovido y financiado por

Iniciativa impulsada por:



Creado dentro del Plan Complementario de Agroalimentación AGROALNEXT en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU



Contenido

Introducción y Objetivos	4
Metodología	¡Error! Marcador no definido.
Resultados	¡Error! Marcador no definido.
Conclusiones.....	¡Error! Marcador no definido.
Caso Piloto.....	18

Introducción y Objetivos

El futuro del uso del suelo enfrenta retos cada vez más complejos y urgentes, lo que hace necesario avanzar más allá de la agricultura sostenible hacia sistemas regenerativos y multifuncionales (Soloviev, 2014; Rhodes, 2017). Entre las estrategias innovadoras para optimizar la productividad del suelo, los sistemas agrovoltaicos (APV)—que integran el cultivo agrícola con la producción de energía fotovoltaica (FV)—representan un enfoque prometedor. Sin embargo, una de las principales limitaciones ecofisiológicas de estos sistemas es la notable reducción de disponibilidad lumínica bajo los paneles FV, lo que puede afectar negativamente el crecimiento y la productividad vegetal.

La tolerancia a la sombra, definida como la capacidad de las plantas para sobrevivir y crecer en condiciones de baja intensidad lumínica, sigue siendo poco conocida para la mayoría de especies cultivadas. Una sombra intensa—habitualmente definida como menos del 75% de la radiación natural—puede reducir la fotosíntesis, el crecimiento y el rendimiento, aunque también puede mitigar el estrés abiótico causado por el exceso de luz y temperatura. Asimismo, la sombra puede emplearse como herramienta de manejo para regular parámetros microclimáticos como la evapotranspiración, la competencia con malas hierbas y la protección frente al viento y eventos climáticos extremos (Martins et al., 2008; Ribeiro et al., 2018; Ambujavalli et al., 2019).

Tanto las fuentes naturales como artificiales de sombra pueden influir en el desarrollo vegetal. La sombra natural se produce en sistemas agroforestales o de cultivos asociados, mientras que la sombra artificial puede generarse mediante mallas o instalaciones fotovoltaicas (Li et al., 2020; Thakur & Kumar, 2021). Estos ambientes modifican la morfología, anatomía y fisiología de las plantas, y pueden alterar la síntesis de metabolitos secundarios—especialmente aceites esenciales (AE). Dado que la biosíntesis de estos compuestos está estrechamente ligada al metabolismo primario y a la asimilación fotosintética del carbono, la intensidad lumínica es un factor determinante tanto para el rendimiento como para la calidad (Thakur & Kumar, 2021).

Las plantas medicinales y aromáticas (PMA) son de especial interés en este contexto, ya que su valor agronómico y económico depende no solo de la producción de biomasa, sino también de la concentración y composición de compuestos bioactivos que determinan su calidad farmacéutica. Sin embargo, existe un conocimiento científico limitado sobre la tolerancia a la sombra y la



acumulación de metabolitos secundarios en PMA adaptadas a climas templados.

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar si determinadas especies de PMA cultivadas en regiones templadas pueden mantener una calidad farmacéutica adecuada bajo condiciones de sombreado. Para ello, se desarrolló un experimento de campo de tres años en Huesca, España, para evaluar el crecimiento vegetal, el rendimiento de biomasa y la producción de aceites esenciales bajo distintos regímenes de luz.

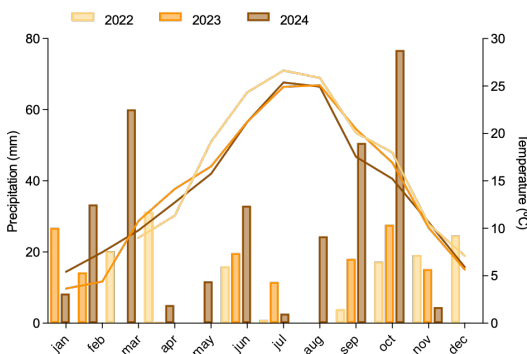
Concretamente, los objetivos fueron:

1. Evaluar los efectos del sombreado en la biomasa y el rendimiento en AE de **Salvia officinalis L.**, **Artemisia absinthium var. candleri**, **Mentha suaveolens** y **Origanum vulgare subsp. virens**.
 2. Determinar si el sombreado afecta la composición del AE y la proporción de compuestos activos clave en cada especie.
 3. Identificar especies de PAM adecuadas para su integración en sistemas agrovoltaicos sin comprometer su calidad funcional.
-

Materiales y Métodos

Sitio experimental y material vegetal

El experimento se realizó entre 2022 y 2024 en Huesca, España (47°24'09.5"N, 19°08'60.0"E). El sitio presenta un clima templado continental, con una temperatura media anual de $17,19 \pm 7,3$ °C (2022), $14,48 \pm 7,7$ °C (2023) y $14,33 \pm 6,9$ °C (2024), y una precipitación total anual de 133,35 mm, 133,63 mm y 310,63 mm, respectivamente (Gráfica1). Según analítica, el suelo es arenoso, con bajo contenido de humus (1,35–1,79%), pH neutro a ligeramente alcalino (7,6–7,9) y un contenido de CaCO₃ del 0,6–0,9% (Tabla 1).



Gráfica 1. Precipitación acumulada (mm) y la temperatura media del aire (T °C) entre los años de 2022 y 2024 en la estación de Huesca (SIAR).

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo (0-30cm), en la parcela de estudio.

Suelo 0-30cm		
	Sombra	Luz
pH (1:2.5)	8,5	8,5
CE (dS m-1)	0,18	0,2
N (%)	0,15	0,1
M.O (%)	1,73	2,0
C orgánico (%)	1,00	1,2
Caliza activa (%)	8,00	7,0
Arena (%)	33,10	31,3
Limo (%)	39,80	43,6
Arcilla (%)	27,10	25,1
Textura	Franco arcillosa	Franca



Se evaluaron cuatro especies de PAM: **Salvia officinalis L.**, **Artemisia absinthium var. candleri**, **Mentha suaveolens** y **Origanum vulgare subsp. virens**. Todo el material vegetal procedía del banco de germoplasma del laboratorio de Plantas Medicinales y Aromáticas (CITA) y fue propagado a partir de semillas.

Diseño experimental y tratamiento de sombreado

Las plantas se cultivaron en condiciones de campo en parcelas de 10 m² dispuestas en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Se establecieron tres tratamientos lumínicos:

- **Control (C):** luz solar plena.
- **Sombreado al 50% (S50):** malla de sombreado verde (LC Packaging TPI Ltd.; 35 g m⁻²) instalada sobre estructuras de 3 m.
- **Sombreado total (S100):** cobertura completa que simula condiciones bajo paneles FV densos.

Las mallas se instalaron en estructuras ajustables que permitían su retirada temporal durante la cosecha y la toma de datos. La intensidad de sombreado se verificó mediante un optómetro Gigahertz-Optik X12 que mide UV-A, UV-B y PAR (densidad de flujo de fotones fotosintéticos, PPFD). Los datos microclimáticos se registraron de forma continua con un Omega Datalogger 'OM-EL-USB-2-PLUS'.

Efectos microclimáticos del sombreado

Se utilizaron tres dataloggers para medir temperatura y humedad del suelo cada media hora entre el 25/01/2024 y el 22/08/2024. El modelo empleado fue el TOMST TMS, de 29 cm de longitud. Cada unidad incluía un sensor de humedad en el extremo inferior y tres sensores de temperatura situados a diferentes niveles: uno en la parte superior protegido de la radiación directa, un segundo a 16 cm y un tercero a 6 cm, junto al sensor de humedad. Los dataloggers se enterraron a una profundidad de 20 cm.

Biomasa Fresca

La biomasa fresca (FM) se cuantificó tras cada cosecha. El material vegetal fresco (kg) se pesó inmediatamente después de su recolección. Las cosechas y el control de malas hierbas se realizaron manualmente en los

estados fenológicos óptimos para cada especie.

Rendimiento en aceites esenciales y análisis fitoquímico

Las partes aéreas secas de las plantas se sometieron a un proceso de hidrodestilación mediante un aparato tipo Clevenger (100 g de muestra en 1000 mL de agua, durante 1 hora). El contenido de aceite esencial (EO) se obtuvo por pesada como masa por 100 g de material vegetal seco, y se estimó el rendimiento en kg/ha. Cada determinación analítica se realizó por triplicado.

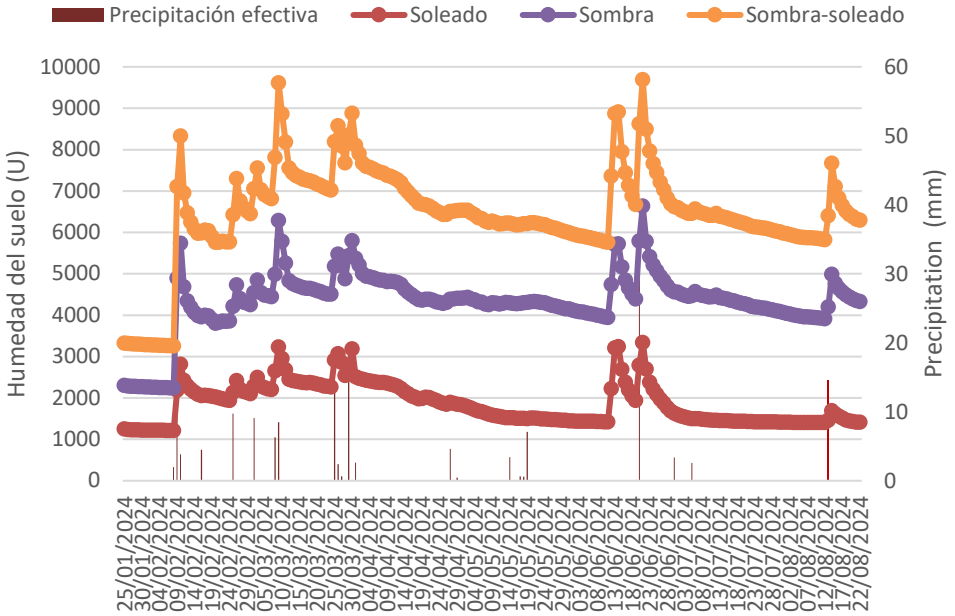
Para el análisis cualitativo y cuantitativo de la composición del aceite esencial se empleó cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID), acoplada a espectrometría de masas (MS), expresándose la concentración de cada compuesto detectado como intensidad relativa (%).

Resultados

Efectos microclimáticos del sombreado

Los registros microclimáticos mostraron diferencias claras entre tratamientos (Gráfica 2). El tratamiento S50 presentó los valores más altos de humedad del suelo a lo largo del periodo monitorizado. Este patrón se atribuye a que la malla al 50 % acumuló agua de escorrentía en la zona próxima a la sonda de humedad, generando lecturas consistentemente superiores. En contraste, el tratamiento control (C/no shading) mostró los valores más bajos, coherentes con una mayor exposición al sol y tasas de evapotranspiración más elevadas. El tratamiento S100 mantuvo niveles intermedios y más estables de humedad.

Estas diferencias en la disponibilidad hídrica, junto con la reducción de radiación incidente en los tratamientos de sombreado, sugieren un impacto directo sobre el crecimiento vegetal y la acumulación de aceites esenciales, tal como se observa en las secciones siguientes.



Gráfica 2. Datos de precipitación (mm) y de humedad del suelo (0-6 cm) desde enero a agosto de 2024 en los tres tratamientos de sombreado sobre el cultivo de PAM: C/No shading; S50/ semi-shading; S100/shading obtenidos con sondas.

Producción de Biomasa fresca.

La producción de biomasa fresca varió notablemente entre especies, tratamientos y años (Tabla 2; Figura 1).

Artemisia absinthium mostró las mayores producciones absolutas. El tratamiento control registró la media más alta (7.673 kg ha⁻¹), especialmente impulsada por los elevados rendimientos de 2023. Bajo S100 la producción disminuyó a 5.503 kg ha⁻¹, mientras que S50 presentó valores intermedios (6.383 kg ha⁻¹). Esto sugiere que la especie tolera cierto nivel de sombreado, aunque la luz plena favorece su crecimiento

máximo.

En *Mentha suaveolens*, la respuesta fue diferente: los valores más altos se obtuvieron bajo S100 (712 kg ha⁻¹), seguidos de S50 (669 kg ha⁻¹) y el control (559 kg ha⁻¹). Esta tendencia indica una mayor adaptabilidad de la especie a condiciones de baja radiación, posiblemente debido a su ecología natural y su fisiología más tolerante a ambientes sombreados.

En *Origanum vulgare subsp. virens*, el sombreado al 100 % promovió el mayor rendimiento (1.094 kg ha⁻¹), superando al control (907 kg ha⁻¹). El sombreado parcial (S50) produjo valores algo menores (859 kg ha⁻¹). La respuesta positiva al sombreado total sugiere una buena tolerancia y una posible optimización del balance hídrico bajo condiciones de radiación reducida.

La producción de *Salvia officinalis* fue muy variable entre años, pero mostró un patrón claro: S50 obtuvo la mayor media (1.629 kg ha⁻¹), mientras que el control y S100 mostraron valores similares, pero más bajos (1.268 y 1.156 kg ha⁻¹, respectivamente). Esto indica que un nivel moderado de sombra puede resultar beneficioso para esta especie, posiblemente al reducir el estrés lumínico y térmico.



Tabla 2. Producción de biomasa fresca (Kg/ha) durante los años de 2022, 2023 y 2024, para las especies estudiadas y los diferentes tratamientos de sombra (C: Control/No shading; S50: sombreado al 50% /semi-shading; S100: sombreado al 100%/Shading).

Producción de biomasa fresca (kg ha ⁻¹)						
Especie	Tratamiento	Año			Media	Desviación
		2022	2023	2024		
<i>Artemisia absinthium</i> L.	C	7500	13200	2320	7673	5442
	S100	6300	7800	2410	5503	2782
	S50	5100	11700	2350	6383	4805
<i>Mentha rotundifolia</i>	C	716	639	320	559	210
	S100	716	790	630	712	80
	S50	716	714	578	669	79
<i>Origanum vulgare</i> subsp. <i>virens</i>	C	665	585	1470	907	489
	S100	665	743	1875	1094	677
	S50	665	658	1253	859	341
<i>Salvia officinalis</i> L.	C	2700	544	560	1268	1240
	S100	1200	489	1780	1156	647
	S50	2100	200	2587	1629	1261

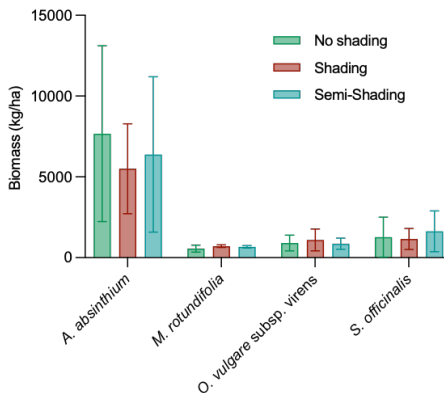


Figura 1. Biomasa fresca (kg/ha) recolectada de las distintas especies involucradas en el estudio, según tratamiento: C (No shading); S50 (Semi-shading) y S100 (Shading). Los resultados se presentan como la media ± desviación estándar de los tres años (2022, 2023 y 2024).

Producción de aceite esencial

El rendimiento en aceites esenciales (AE) también mostró variación entre especies y tratamientos (Tabla 3; Figura 2).

En *A. absinthium*, el sombreado parcial (S50) generó el mayor rendimiento medio (242 L ha⁻¹), superando tanto al control (168 L ha⁻¹) como a S100 (123 L ha⁻¹). Esto sugiere que ligeras reducciones de luminosidad pueden favorecer la acumulación de metabolitos secundarios en esta especie.

En *M. suaveolens*, los valores fueron más equilibrados, pero S50 volvió a producir la media más alta (32 L ha⁻¹), seguida de S100 (27 L ha⁻¹) y el control (15 L ha⁻¹). Este patrón coincide con la respuesta observada en biomasa y respalda la idea de una mayor eficiencia metabólica bajo sombra.

En *O. vulgare*, el sombreado parcial también promovió los mayores rendimientos (73 L ha⁻¹), mientras que el control presentó valores intermedios (54 L ha⁻¹) y S100 los más bajos (41 L ha⁻¹). Esto indica que la especie responde de manera óptima a una reducción moderada de radiación.

Finalmente, en *S. officinalis*, S50 mostró nuevamente el valor medio más alto (110 L ha⁻¹), mientras que el control y S100 registraron menores rendimientos (102 y 49 L ha⁻¹, respectivamente). Estos resultados sugieren que el estrés lumínico bajo radiación plena podría reducir la eficiencia biosintética del AE.



Tabla 3. Producción de aceite esencial (L ha⁻¹) durante los años de 2022, 2023 y 2024, para las especies estudiadas y los diferentes tratamientos de sombra.

Producción de aceite esencial (L ha⁻¹)

Especie	Tratamiento	Año			Media	Desviación
		2022	2023	2024		
<i>Artemisia absinthium</i> L.	C	240	213	51	168	102
	S100	240	73	56	123	101
	S50	280	360	87	242	140
<i>Mentha rotundifolia</i>	C	31	3	10	15	14
	S100	27	6	50	27	22
	S50	54	4	37	32	26
<i>Origanum vulgare</i> subsp. <i>virens</i>	C	74	3	87	54	45
	S100	55	2	67	41	35
	S50	133	2	83	73	66
<i>Salvia officinalis</i> L.	C	260	19	28	102	137
	S100	114	9	24	49	57
	S50	283	17	30	110	150

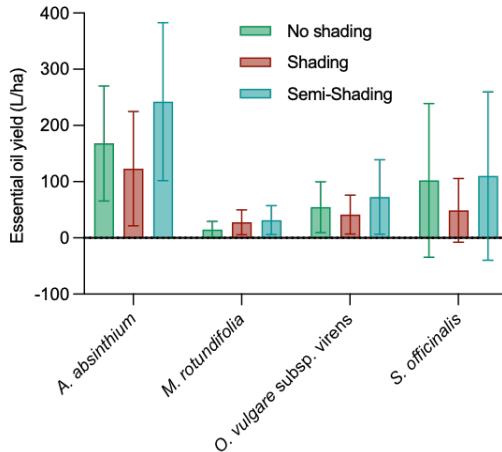


Figura 2. Rendimiento de aceite esencial (L/ha) de las distintas especies recolectadas durante el estudio (2022, 2023 y 2024), según tratamiento: C (No shading); S50 (Semi-shading) y S100(Shading). Los resultados se expresan como media ± desviación estándar.

Análisis fitoquímico de los aceites esenciales

Las cuatro especies mantuvieron sus perfiles químicos característicos, aunque se observaron modificaciones específicas asociadas al tratamiento lumínico.

Mentha suaveolens

Los compuestos dominantes fueron piperitona y óxido de piperitona (Figura 2).

Los análisis mostraron diferencias significativas **solo en estos dos compuestos**, con valores distintos entre tratamientos de sombreado y no sombreado, lo que indica una sensibilidad particular de estas rutas biosintéticas a la intensidad lumínica.

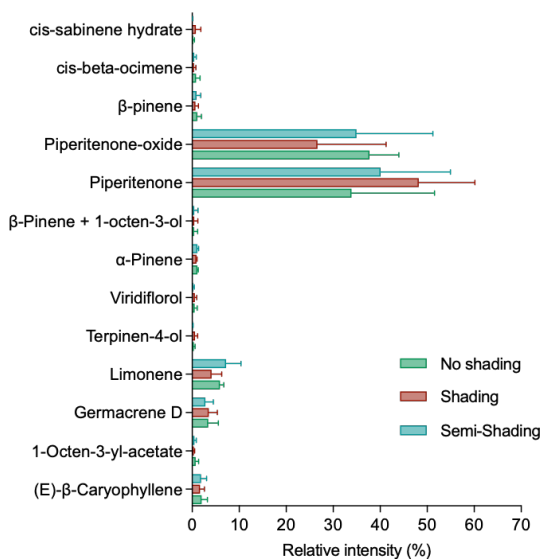


Figura 2. Compuestos mayoritarios del AE de *M. suaveolens* (%).



Origanum vulgare subsp. Virens

El perfil dominado por monoterpenos mostró variaciones principalmente en el compuesto **carvacrol** (Figura 3). Se observaron diferencias entre S100 y C, y entre S100 y S50.

Esto sugiere que la síntesis de carvacrol es especialmente sensible al nivel de sombra.

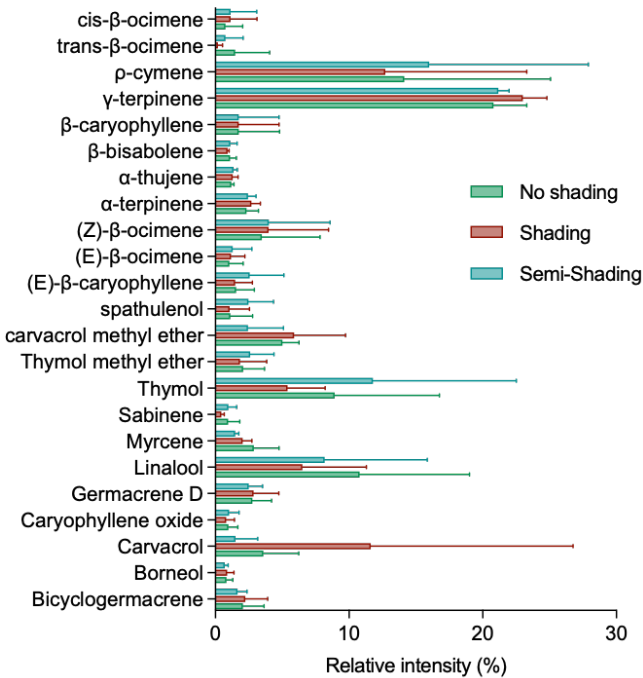


Figura 3. Compuestos mayoritarios del AE de *O. vulgare subsp. virens* (%).

Artemisia absinthium

El perfil fitoquímico se mantuvo estable, con cambios únicamente en **Z-chrysanthenyl acetate** (Figura 4), donde se encontraron diferencias entre S100

y C.

Este resultado indica una alta estabilidad del quimiotipo frente a la variación lumínica.

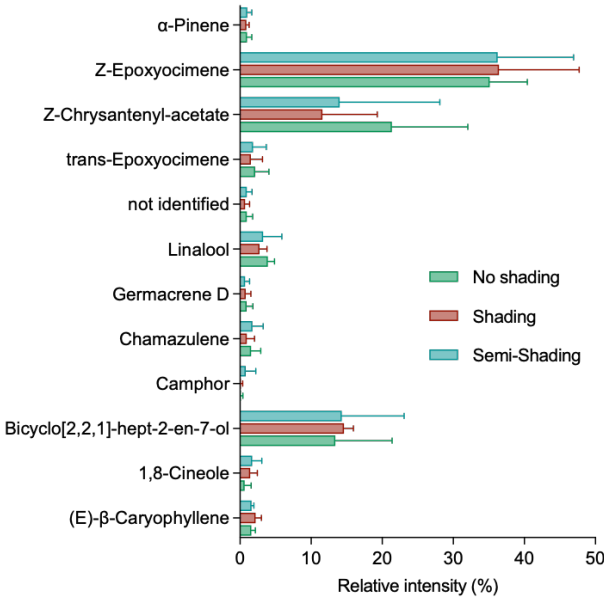


Figura 4. Compuestos mayoritarios del AE de *A. absinthium* (%).

Salvia officinalis

En la salvia, los cambios se limitaron a α -**thujona**, con diferencias entre S100 y S50 (Figura 5). El resto de los compuestos mayoritarios se mantuvieron estables, indicando una relativa robustez de la composición del AE frente al sombreado.

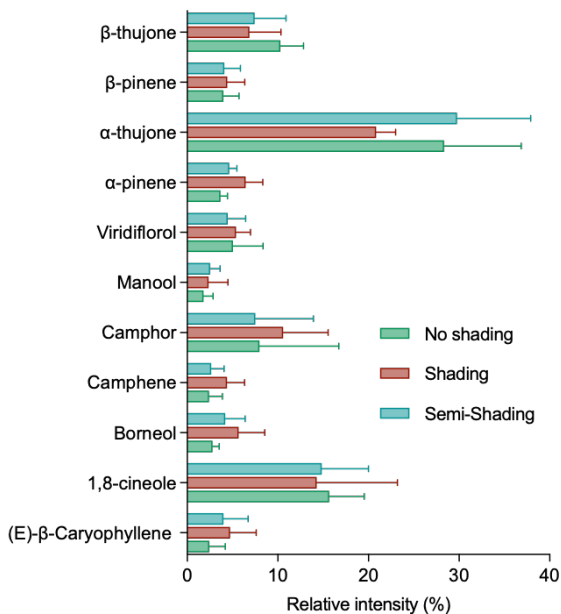


Figura 5. Compuestos mayoritarios del AE de *S. officinalis*(%).

Conclusiones

- Las condiciones de sombreo modificaron tanto el microclima como la producción de biomasa y aceites esenciales de las especies estudiadas, confirmando la importancia del régimen lumínico en el cultivo de PAM en sistemas agrovoltaicos.
- *Mentha suaveolens*, *Origanum vulgare* y *Salvia officinalis* mostraron respuestas positivas o neutras al sombreo, lo que las convierte en buenas candidatas para sistemas APV.
- *Artemisia absinthium* mantuvo rendimientos elevados pero mostró cierta disminución en producción de biomasa bajo sombra total. Sin embargo, su rendimiento en AE aumentó bajo sombreo parcial.
- La composición química de los aceites esenciales fue mayoritariamente estable, con variaciones en un número reducido de compuestos específicos para cada especie.
- En conjunto, los resultados indican que es posible integrar varias PAM en sistemas agrovoltaicos sin comprometer su calidad farmacéutica, y en algunos casos incluso mejorando la producción de aceites esenciales.



Caso Piloto en Planta Fotovoltaica GALP/Escatrón

El presente estudio se desarrolló como caso piloto dentro del parque fotovoltaico de GALP en Escatrón (Zaragoza), con el objetivo de evaluar la supervivencia, adaptación y productividad de tres especies aromáticas bajo dos condiciones ambientales: sin placas (control) y entre placas fotovoltaicas.

Diseño Experimental y Condiciones del Sitio

Localización y clima

El experimento se desarrolló entre marzo de 2023 y octubre de 2024 en Escatrón (España; 41°15'10.4"N, 0°16'10.6"W), un área caracterizada por clima continental semiárido, con fuertes oscilaciones térmicas y precipitaciones escasas.

- Precipitación total (SIAR):
 - 2023: 67,61 mm
 - 2024: 142,27 mm
- Temperatura media anual (SIAR):
 - 2023: 19,06 ± 6,5 °C
 - 2024: 17,84 ± 7,0 °C

Estas condiciones evidencian un ambiente de alta demanda evaporativa, lo que convierte al sitio en un escenario apropiado para evaluar la tolerancia al estrés hídrico y lumínico de las PMA.

Suelo

En analítica de suelo compuesta (0-30 cm), se ha identificado un suelo franco arcilloso, con notable alcalinidad (pH 8,43), bajo contenido de materia orgánica (1,86 g/100 g), baja salinidad y alto contenido en carbonatos (41 g/100 g). Los niveles de Cu y Zn fueron bajos, lo que puede limitar su disponibilidad para las plantas.

En conjunto, el suelo presenta fertilidad moderada-baja, típica de ambientes semiáridos con limitaciones para cultivos exigentes

Material vegetal y disposición experimental

Se emplearon tres especies:

- *Santolina chamaecyparissus* L.
- *Thymus vulgaris*
- *Artemisia absinthium* var. *Candial*

Todas provenientes del banco de germoplasma del CITA.

Se establecieron dos ensayos:

1. Parcela sin placas (0,1 ha por especie)
 - 100 plantas/especie
 - Funcionó como área control y “isla de biodiversidad”.
2. Plantación entre placas fotovoltaicas (0,045 ha por especie) (Imagen 1).
 - 3 filas × 33 plantas/especie
 - Objetivo: evaluar la viabilidad de cultivo bajo el sombreado y las condiciones físicas del parque operativo.



Imagen 1. Plantación entre placas.



Resultados

Supervivencia de plantas

La supervivencia mostró fuertes diferencias entre especies y tratamientos (Tabla 4).

- *Ajenjo* fue la única especie con alta supervivencia entre placas, manteniéndose por encima del 80% hasta 2025.
- *Santolina* y *tomillo* mostraron drástica mortalidad, especialmente a partir del segundo año.

La sombra parcial ofrecida por las placas parece beneficiar la supervivencia de *Artemisia*, pero perjudicar claramente a *Santolina* y *Tomillo*.

Tabla 4: Supervivencia (%) de las especies evaluadas entre 2023 y 2025.

Especie	Supervivencia de plantas (%)					
	Sin placas			Entre placas		
Año	2023	2024	2025	2023	2024	2025
<i>Santolina chamaecyparissus</i>	100,0	73,7	10,1	100,0	17,5	8,5
<i>Artemisia absinthium</i>	100,0	42,2	30,1	100,0	88,0	84,0
<i>Thymus vulgaris</i>	100,0	85,2	8,3	100,0	15,0	13,0

Producción de biomasa fresca (kg/ha) (Tabla 5).

- *Artemisia absinthium* produjo más biomasa sin placas, pero mantuvo un rendimiento aceptable entre placas, pese al estrés lumínico y del suelo.
- La sombra redujo la productividad, pero no la anuló, lo que confirma su potencial en sistemas agrovoltaicos.
- *Santolina* presentó baja productividad, acorde con su escasa supervivencia.

Tabla 5. Producción de biomasa fresca (Kg/ha) durante la campaña de 2023 y 2024 para 3 especies estudiadas.

Producción biomasa fresca (kg/ha)			
ESPECIE	TRATAMIENTO	2023	2024
<i>Artemisia absinthium</i>	Entre placas		301,2
<i>Artemisia absinthium</i>	Sin placas	424,8	679,2
<i>Santolina chamaecyparissus</i>	Mezcla		79,6

Producción aceite esencial (mL/kg planta seca)

- El rendimiento en aceite de *A. absinthium* fue **superior en condiciones sin placas**, lo cual coincide con su mayor acumulación de biomasa (Tabla 6).
- Entre placas, el contenido disminuyó a **0,70 mL/kg**, probablemente asociado a menor disponibilidad lumínica y a estrés por suelo compactado
- *Santolina chamaecyparissus* mostró un **alto rendimiento en aceite**, pero su baja supervivencia limita su viabilidad como cultivo agrovoltaico.

Tabla 6. Producción de biomasa fresca (Kg/ha) durante la campaña de 2023 y 2024 para 3 especies estudiadas.

Producción aceite (mL/kg planta seca)			
ESPECIE	TRATAMIENTO	2023	2024
<i>Artemisia absinthium</i>	Entre placas		0,70
<i>Artemisia absinthium</i>	Sin placas	1,90	1,08
<i>Santolina chamaecyparissus</i>	Mezcla		8,84



Los resultados del caso piloto indican que:

- *Artemisia absinthium* var. *Candial* es la única especie con alto potencial agrovoltaico, debido a:
 - Excelente supervivencia entre placas.
 - Producción estable de biomasa.
 - Rendimientos de aceite moderados incluso bajo sombra estructural.

- *Santolina chamaecyparissus* y *Thymus vulgaris* presentaron limitaciones importantes:
 - Muy baja supervivencia entre placas
 - Sensibilidad al estrés hídrico y a la compactación del suelo
 - Productividad insuficiente para justificar su implantación en un entorno fotovoltaico operativo.

En conjunto, el piloto confirma que no todas las aromáticas pueden cultivarse eficazmente bajo estructuras fotovoltaicas, y que la selección de especies debe considerar tolerancia a la sombra, rusticidad y eficiencia hídrica.

Conclusiones

1. El parque fotovoltaico de en Escatrón proporciona un entorno altamente restrictivo para el cultivo de PMA, debido a sequedad extrema, exceso de carbonatos, compactación y limitación lumínica bajo paneles.
2. *Artemisia absinthium* var. *Candial* se posiciona como la mejor opción para sistemas agrovoltaicos, con supervivencia >80% y producción aceptable entre placas.
3. *Santolina chamaecyparissus* y *Thymus vulgaris* no son especies adecuadas para su integración en parques fotovoltaicos operativos debido a su elevada mortalidad y baja productividad.
4. La productividad de biomasa y el rendimiento en aceite esencial se ven reducidos bajo placas, pero no de forma incompatible con un sistema agrovoltaico diversificado.
5. Este caso piloto constituye un ejemplo relevante para el diseño de modelos de restauración productiva, mejora de biodiversidad y sinergias agroenergéticas en instalaciones fotovoltaicas consolidadas.



BIBLIOGRAFÍA

Martins, S. C. V., Galmés, J., Cavatte, P. C., Pereira, L. F., Ventrella, M. C., ... DaMatta, F. M. (2014). *Understanding the low photosynthetic rates of sun- and shade-grown coffee leaves: Bridging the gap on the relative roles of hydraulic, diffusive and biochemical constraints to photosynthesis*. *PLOS ONE*, 9(4), e95571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095571>

Niether, W., Armengot, L., Andres, C., Schneider, M., & Gerold, G. (2018). *Shade trees and tree pruning alter throughfall and microclimate in cocoa (Theobroma cacao L.) production systems*. *Annals of Forest Science*, 75, Article 38. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0723-9>

Rhodes, C. J. (2017). *The imperative for regenerative agriculture*. *Science Progress*, 100(1), 80–129. <https://doi.org/10.3184/003685017X14876775256165DevelopmentAid+2PMC+2>

Soloviev, E. R., & Landua, G. (2016). *4 Levels of Regenerative Agriculture*. Terra Genesis International. Recuperado de <https://ethansoloviev.com/wp-content/uploads/2019/02/Levels-of-Regenerative-Agriculture.pdf>
[Regeneration International](#)



Creado dentro del Plan Complementario de Agroalimentación AGROALNEXT en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU

