

Análisis LCA, técnico y económico de los escenarios analizados



Índice

1.	Introducción.....	3
2.	Definición de escenarios.....	5
2.1.	Instalación convencional (altura de los paneles: 0.5 m)	7
2.2.	Instalación elevada (altura de los paneles: 3.6m)	9
3.	Análisis del Ciclo de Vida. Objetivo, ámbito y aplicación	12
4.	Análisis de inventario del ciclo de vida.....	17
5.	Evaluación del impacto del ciclo de vida.....	24
6.	Interpretación de resultados	32
6.1.	Resultados de la evaluación de impacto de los superprocesos	33
6.2.	Comparación relativa entre escenarios.....	34
6.3.	Análisis de incertidumbre: simulación Monte Carlo	37
6.3.1.	Análisis de sensibilidad.....	38
6.3.2.	Análisis de incertidumbre para comparar dos escenarios.....	43
6.4.	Conclusiones	52
7.	Análisis técnico.....	55
7.1.	Criterios técnicos de diseño en sistemas agrivoltaicos	56
7.1.1.	Altura de las estructuras.....	56
7.1.2.	Sombreado y transmisión de radiación	56
7.1.3.	Compatibilidad con mecanización agrícola.....	57
7.2.	Evaluación técnica de los escenarios estudiados.....	58
7.2.1.	Sistemas fotovoltaicos convencionales (PV_baja y PV_alta).....	58
7.2.2.	Sistema agrivoltaico de estructura baja (AV_baja)	58
7.2.3.	Sistema agrivoltaico de estructura elevada (AV_alta)	59
7.3.	Integración técnico-funcional energía-agricultura.....	59
7.3.1.	Microclima.....	60
7.3.2.	Uso del suelo.....	60
7.3.3.	Flexibilidad operativa	61
7.4.	Síntesis.....	61
8.	Análisis económico.....	63
8.1.	Objetivo y alcance del análisis.....	64
8.2.	Costes de inversión (CAPEX).....	65

8.2.1. Unidades de referencia y conversión a €/ha	65
8.2.2. Rangos de referencia.....	66
8.2.3. Desglose por partidas y principales referencias de coste	66
8.2.4. Estructura, cimentaciones y condicionantes regulatorios	67
8.2.5. Riesgos y contingencias.....	67
8.3. Costes de operación y mantenimiento (OPEX)	67
8.3.1. Alcance y partidas consideradas.....	68
8.3.2. Sistemas fotovoltaicos convencionales	68
8.3.3. Sistemas agrivoltaicos.....	69
8.3.4. Consideraciones operativas y fuentes de incertidumbre.....	69
8.4. Ingresos y rendimiento económico.....	70
8.4.1. Producción de energía eléctrica y su valoración económica.....	70
8.4.2. Producción agrícola en los escenarios agrivoltaicos	71
8.4.3. Implicaciones económicas de la doble producción y métricas de rentabilidad	71
8.5. Riesgos e incertidumbres	72
8.5.1. Principales fuentes de riesgo por categoría	73
8.5.2. Mitigación y resiliencia del modelo agrivoltaico	74
8.5.3. Gestión de riesgos y seguimiento	74
8.5.4. Tratamiento cuantitativo de la incertidumbre.....	75
8.6. Síntesis del análisis	75
8.6.1. Diferencias de coste	75
8.6.2. Diferencias de ingresos	76
8.6.3. Diseño y regulación.....	76
8.6.4. Escenarios.....	76
8.6.5. Conclusión general	77
9. Referencias	78

1. Introducción

Los países de la Unión Europea se han comprometido a alcanzar una descarbonización del 42,5 % en la generación eléctrica para 2030, lo que exige una rápida expansión de las tecnologías de energía renovable (Directive (EU) 2023/2413, 2023). Entre ellas, la energía solar fotovoltaica (FV) está llamada a desempeñar un papel clave para cumplir este objetivo (Union, 2021). En España, se prevé que la capacidad fotovoltaica instalada alcance los 76 GW en 2030 (incluidos aproximadamente 19 GW de autoconsumo), dentro de un sistema eléctrico con un 81 % de generación renovable (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2025).

Para alcanzar esos 76 GW, se estima que serían necesarias entre 66.000 y 108.000 hectáreas ($\approx 0,28-0,46$ % de la superficie agrícola utilizada), lo que previsiblemente intensificará la competencia por el uso del suelo agrícola y, en consecuencia, generará tensiones económicas y sociales (Schindele et al., 2020). Una estrategia prometedora para mitigar este conflicto consiste en producir simultáneamente alimentos y energía en un mismo terreno. En este contexto, los sistemas agrivoltaicos (AVS), que integran la generación eléctrica mediante diseños fotovoltaicos compatibles con prácticas agrícolas, han surgido como una alternativa capaz de mantener la sinergia entre producción alimentaria y generación energética (Agostini et al., 2021; Katsikogiannis et al., 2022; Toledo & Scognamiglio, 2021).

A escala global, la capacidad instalada de AVS ha seguido una trayectoria claramente ascendente: de unos 5 MW en 2012 a alrededor de 2,8 GW en 2020, alcanzando aproximadamente 14 GW en 2021. Además, datos parciales recientes apuntan a unos 10 GW solo en Estados Unidos a noviembre de 2024, lo que sugiere que la capacidad mundial sería significativamente mayor (Gorjian et al., 2022; Ravilla et al., 2024).

En este contexto, el presente trabajo expone los resultados del análisis técnico, económico y de impacto ambiental asociado a la implantación de sistemas agrivoltaicos en las Islas Baleares.

2. Definición de escenarios

Las características principales de la instalación fotovoltaica base utilizada en este informe se indican en la Tabla 1. El terreno considerado para la instalación es de 1 ha. La estructura está formada por 80 mesas de 20 paneles fotovoltaicos (PV) cada una, dispuestas en 10 filas de 8 mesas cada una, con 5 m de separación entre filas (desde el final de la vertical bajo una fila hasta el inicio de la vertical de la siguiente). Hay un margen de 4.64 m en ambos extremos según el ancho del terreno (dirección X), y de 6.87 m en ambos extremos de acuerdo con el largo (dirección Y) (Figura 1 y 2). El terreno ocupado por los PVs, considerando un margen alrededor de la instalación de 1 m a cada lado, es de 0.818 ha.

Para esta configuración, se han considerado dos opciones:

Instalación convencional (PV_bajo) (Figura 3a): paneles fotovoltaicos instalados a una altura sobre el nivel del terreno de 0.5 m (punto más bajo).

Instalación elevada (PV_alto) (Figura 3b): paneles fotovoltaicos instalados a una altura sobre el nivel del terreno de 3.6 m (punto más bajo).

Tabla 1. Características de la instalación fotovoltaica base.

Área del terreno (ha)	1.00
Terreno ocupado por PVs (ha)	0.818
Margen a los lados (m)	4.64
Margen a los extremos (m)	6.87
Núm. columnas	8
Núm. filas	10
Espacio entre filas (m)	5
Ancho PV (m)	1.134
Largo PV (m)	2.382
Elevación PV (m)	
Sistema convencional	0.5
Sistema elevado	3.6
Inclinación (°)	30
Transparencia PV (%)	0
Electricidad generada (MWh)	1725

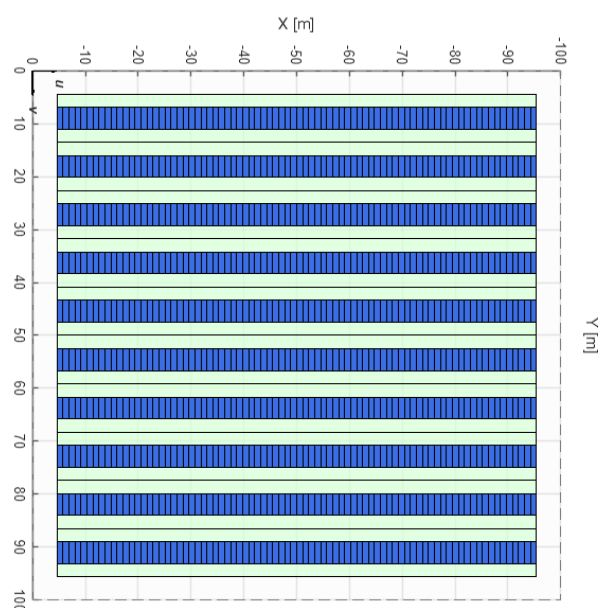


Figura 1. Vista en planta de la instalación fotovoltaica. Disposición de los PVs en el terreno.

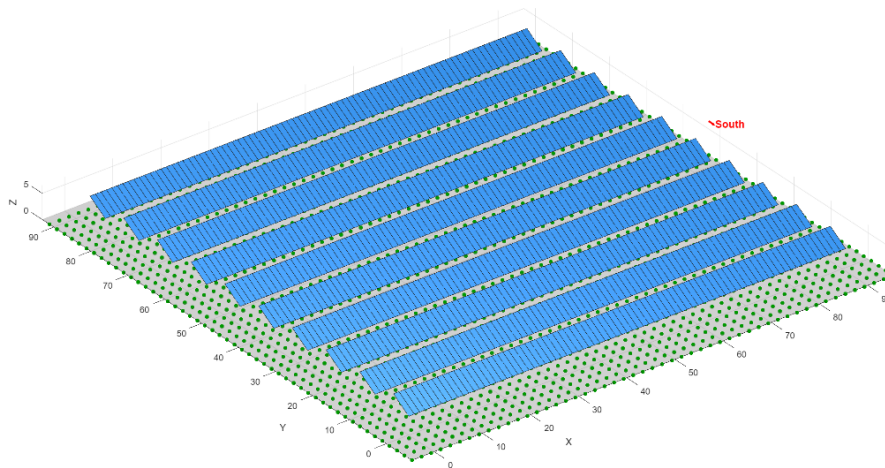


Figura 2. Vista tridimensional de la disposición de los paneles fotovoltaicos.

2.1. Instalación convencional (altura de los paneles: 0.5 m)

La figura 3A muestra la geometría y disposición de los módulos fotovoltaicos, instalados con la altura habitual en sistemas convencionales. La figura 4 ilustra, a modo de ejemplo, la distribución espacial del porcentaje de sombra relativo (RSR) acumulado en abril, julio y octubre en la superficie del terreno bajo el arreglo fotovoltaico. El RSR se representa mediante una escala fija entre 0 y 100%, donde los tonos amarillos corresponden a zonas prácticamente libres de sombra y los tonos azul-violeta señalan áreas con elevada frecuencia de sombreado. La inclusión de la geometría de los paneles permite relacionar fácilmente la posición de las sombras con el arreglo fotovoltaico.

Las tres imágenes comparten la misma escala cromática, lo que facilita la comparación estacional. En abril y octubre, la menor altura solar genera bandas de sombra más amplias y desplazadas hacia los extremos superior e inferior del terreno. En cambio, en julio, cuando el Sol alcanza su máxima elevación, las sombras se estrechan y se concentran bajo la proyección directa de los módulos. Este contraste refleja cómo la variación anual de la posición solar modula el patrón de sombreado y, en consecuencia, la disponibilidad de radiación para los cultivos en sistemas agrivoltaicos.

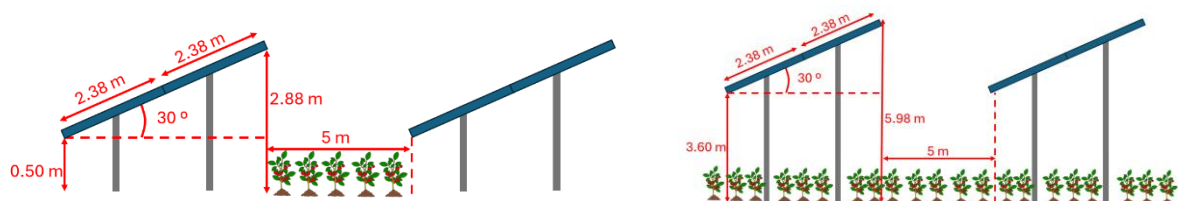


Figura 3. Escenarios fotovoltaicos. A) Instalación convencional y B) Instalación elevada.

Además del análisis espacial del sombreado, resulta útil examinar cómo varía la distribución de los intervalos de RSR a lo largo del año. La figura 5 muestra la descomposición mensual del porcentaje de superficie perteneciente a cada intervalo de sombra en la banda intermedia del sistema, es decir, en el espacio entre las filas de paneles. Cada barra representa un mes y está dividida en segmentos coloreados según el rango de RSR, permitiendo visualizar de forma integrada la estacionalidad del sombreado.

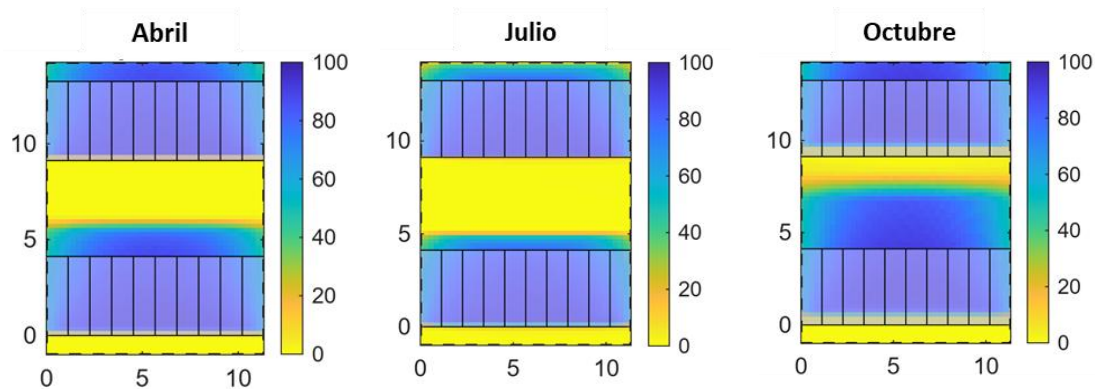
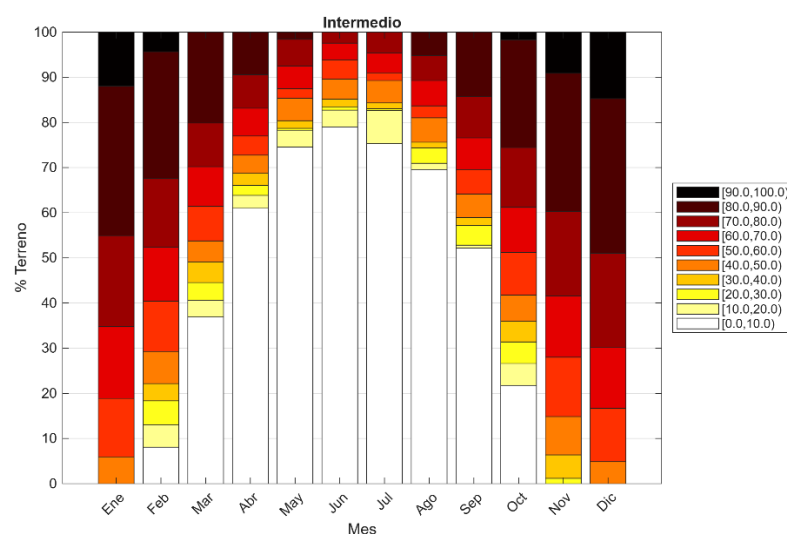


Figura 4. Distribución espacial estimada del porcentaje de sombra relativo (RSR, 0–100%) durante los meses de abril, julio y octubre en una instalación convencional ($h=0.5$ m).

Durante los meses centrales (junio-agosto), la mayor altura solar reduce la presencia de sombras intensas ($RSR > 70\%$), dando lugar a una mayor proporción de terreno en intervalos bajos o moderados de RSR, lo que coincide con lo observado en los mapas espaciales. En los meses de invierno y parte de otoño y primavera, la sombra se intensifica y se distribuye en intervalos altos (RSR 70–100%), reflejando la mayor longitud y desplazamiento de las sombras en estas épocas del año. En conjunto, esta figura sintetiza la dinámica anual del sombreado en la zona disponible para el cultivo en agrivoltaico.

En conclusión, esta configuración permite que una parte significativa de la sombra proyectada durante los meses de primavera y verano quede confinada directamente bajo los propios paneles, lo que podría favorecer el cultivo en esa área, especialmente de productos de verano, obteniéndose una buena combinación entre producción de energía y alimentos.



MES	Irradiación (%)
enero	25.4
febrero	39.4
marzo	60.1
abril	76.3
mayo	85.9
junio	89.8
julio	88.6
agosto	82.0
septiembre	68.9
octubre	49.5
noviembre	29.3
diciembre	23.9

Figura 5. Distribución mensual del porcentaje de superficie del terreno perteneciente a cada intervalo de sombra relativo (RSR) en la banda intermedia del sistema agrivoltaico y valores medios mensuales de porcentaje de irradiación (%) para esta zona.

2.2. Instalación elevada (altura de los paneles: 3.6m)

La figura 3B muestra la geometría y disposición de los módulos fotovoltaicos instalados a una altura de 3.6 m (punto más bajo del PV), altura suficiente para poder utilizar maquinaria agrícola por debajo de los paneles. De este modo, el punto más alto de la instalación alcanza los 5,98 m, por lo que resulta compatible con el marco previsto para instalaciones agrivoltaicas en la normativa autonómica. En la actualidad, la altura máxima de los paneles en instalaciones fotovoltaicas sobre el terreno en las Illes Balears viene fijada por el Plan Director Sectorial Energético (PDSEIB), aprobado por el Decreto 33/2015, que establece un límite general de 4 m para este tipo de parques; no obstante, el Anteproyecto de Ley agraria de las Illes Balears incorpora una regulación específica para las instalaciones de energía renovable clasificadas como agrivoltaicas, cuyo artículo 41 prevé que la Administración agraria de cada isla pueda exonerar el cumplimiento de dicho límite de altura hasta un máximo de 6 m, siempre en el seno de explotaciones agrarias y bajo las condiciones establecidas en la propia ley. La figura 6 ilustra, a modo de ejemplo, la distribución espacial del porcentaje de sombra relativo (RSR) acumulado en abril, julio y octubre en la superficie del terreno bajo el arreglo fotovoltaico. En abril se observa un gradiente vertical de sombra, con valores de RSR más elevados bajo las filas de paneles y una franja central con menor porcentaje de tiempo en sombra. En julio, con ángulos solares más altos, la

franja central claramente amarilla indica una zona mucho más soleada, con RSR muy bajo, mientras que las regiones situadas inmediatamente bajo las filas de paneles concentran los mayores porcentajes de sombra. En octubre el patrón se invierte respecto a julio: el corredor central del terreno alcanza los mayores valores de RSR, mientras que los extremos superior e inferior muestran porcentajes de sombra más moderados, reflejando el desplazamiento y alargamiento estacional de las sombras en otoño. En conjunto, las tres simulaciones muestran cómo la combinación de altura de la estructura y trayectoria solar estacional produce un patrón de sombra muy dinámico: en verano la sombra se concentra bajo los módulos, mientras que en primavera y otoño se extiende y desplaza sobre una mayor proporción del terreno.

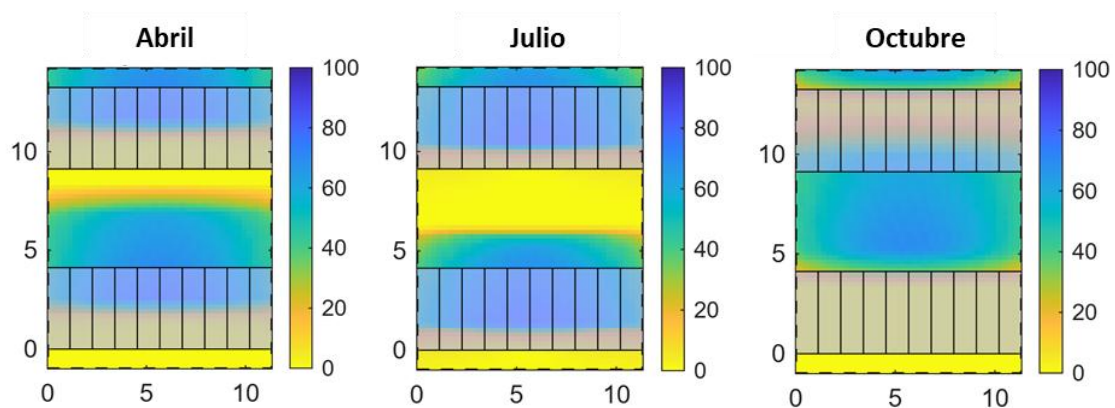


Figura 6. Distribución espacial estimada del porcentaje de sombra relativo (RSR, 0–100%) durante los meses de abril, julio y octubre en una instalación elevada ($h=3.6$ m).

Además del análisis espacial del sombreado, resulta útil examinar cómo varía la distribución de los intervalos de RSR a lo largo del año. La figura 7 muestra la descomposición mensual del porcentaje de superficie perteneciente a cada intervalo de sombra en la banda intermedia del sistema, es decir, en el espacio entre las filas de paneles. Cada barra representa un mes y está dividida en segmentos coloreados según el rango de RSR, permitiendo visualizar de forma integrada la estacionalidad del sombreado.

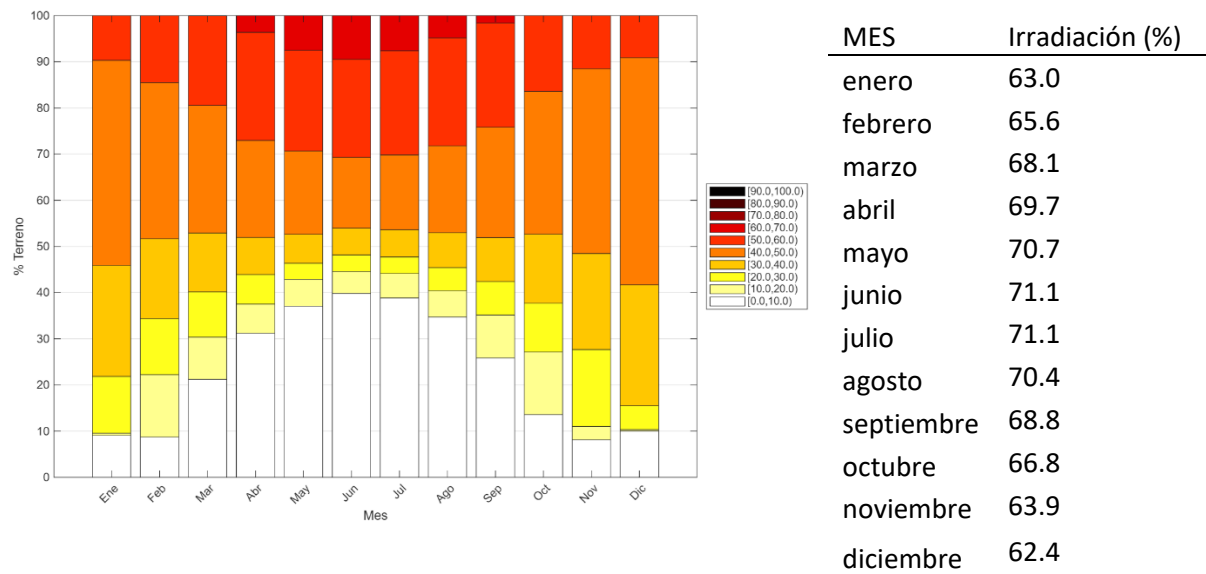


Figura 7. Distribución mensual del porcentaje de superficie del terreno perteneciente a cada intervalo de sombra relativo (RSR) en la banda intermedia del sistema agrivoltaico y valores medios mensuales de porcentaje de irradiación (%) para esta zona.

Durante los meses centrales (junio-agosto), la mayor altura solar reduce la presencia de sombras intensas ($RSR > 35\%$), dando lugar a una mayor proporción de terreno en intervalos bajos o moderados de RSR, lo que coincide con lo observado en los mapas espaciales. En los meses de invierno y parte de otoño y primavera, la sombra se intensifica y se distribuye en intervalos altos ($RSR 70-90\%$), reflejando la mayor longitud y desplazamiento de las sombras en estas épocas del año. En conjunto, esta figura sintetiza la dinámica anual del sombreado en la zona disponible para el cultivo en agrivoltaico.

3. Análisis del Ciclo de Vida. Objetivo, ámbito y aplicación

El análisis del ciclo de vida (ACV) permite estimar los impactos ambientales de un producto o servicio a lo largo de toda su vida útil (obtención de materias primas, fabricación, uso, tratamiento al final de su vida útil, reciclaje y eliminación). El marco metodológico se basa en las normas ISO 14040¹ y 14044². Un ACV comprende cuatro fases: la definición del objetivo y el alcance, el análisis del inventario del ciclo de vida (ICV), la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) y la interpretación de los resultados. La aplicación del marco metodológico del ACV en el presente estudio se explica en las siguientes secciones, divididas en las cuatro fases.

El objetivo de este estudio es evaluar los impactos ambientales de dos diseños agrivoltaicos, y compararlos con dos sistemas fotovoltaicos equivalentes (sin cultivo en el mismo terreno). El estudio se enmarca en un contexto de investigación académica aplicada y está orientado principalmente a la comunidad científica y a responsables de planificación agraria y energética en regiones mediterráneas. Los resultados permitirán comparar alternativas de diseño y apoyar decisiones de implementación de sistemas agrivoltaicos.

El ACV abarca, para los cultivos, todas las etapas desde la obtención de insumos hasta la salida del producto agrícola de la finca (“de la cuna a la puerta”). El enfoque de la cuna a la puerta para la producción de cultivos incluye la demanda de riego, electricidad, fertilizantes, pesticidas, transporte y labores agrícolas para los cultivos. Para los sistemas fotovoltaicos, incluye todo el ciclo completo desde la extracción de materias primas, la fabricación de módulos fotovoltaicos y demás componentes, la construcción de la planta y el mantenimiento operativo (O&M) requerido para los sistemas fotovoltaicos durante su vida útil hasta el fin de ésta (“de la cuna al final del uso”) (Figura 8). Los potenciales impactos ambientales se evaluarán mediante el método Environmental Footprint 3.1 (adapted), versión 1.03, utilizando el conjunto de normalización y ponderación “EF 3.1 normalization and weighting set”, tal como está implementado en el software SimaPro. Se considerarán las categorías de impacto recomendadas por EF 3.1 para estudios comparativos de productos agroalimentarios y sistemas energéticos; una descripción detallada del método y de las categorías utilizadas se presenta en la Sección 3.3.

En el análisis de ciclo de vida (ACV) de sistemas que integran producción agrícola y generación fotovoltaica, es habitual expresar los inventarios por unidad de superficie, lo que facilita la interpretación de los resultados en

¹ International Organization for Standardization. Life cycle assessment – principles and framework, EN ISO 14040:2006. Environmental management. Brussels: European Committee for Standardization 2006.

² International Organization for Standardization. Life cycle assessment - requirements and guidelines, EN ISO 14044:2006. Environmental management. Brussels: European Committee for Standardization 2006.

términos de uso del suelo. En este estudio, los procesos base se modelaron por 1 ha·año e incluyen: planta fotovoltaica de estructura baja (PV_baja), planta fotovoltaica de estructura elevada (PV_alta), sistema agrivoltaico de estructura baja con cultivo entre filas (AV_baja), sistema agrivoltaico de estructura elevada con cultivo en toda la superficie (AV_alta) y cultivo convencional a campo abierto. En los procesos tanto PV como AV se asumió la misma producción eléctrica anual por hectárea, de modo que la función energética es equivalente entre escenarios. El análisis se ha realizado para condiciones representativas de siete cultivos (cebolla, lechuga, melón, patata, pimiento, sandía y tomate) con alta demanda en instalaciones turísticas en las Islas Baleares (España), producidos bajo clima mediterráneo litoral. Los datos de producción de los cultivos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) se han obtenido de los informes anuales del IRFAP para las campañas 2021–2023 (Conselleria agricultura, pesca i alimentació. Institut de recerca i formació agroalimentaria i pesquera Illes Balears, 2021), y la vida útil de los sistemas fotovoltaicos se ha considerado de 30 años, representativa de la tecnología comercial actual de módulos c-Si. Los procesos de fondo (producción de materiales, energía, fertilizantes, etc.) se modelan con datos europeos o de resto del mundo procedentes de bases de datos reconocidas (ecoinvent, Agri-footprint, Agrivalyse), consideradas representativas del mix de mercado actual.

La unidad funcional comparativa del estudio es la provisión conjunta de electricidad y producto agrícola equivalente al rendimiento anual de 1 ha de sistema agrivoltaico elevado (AV_alta). El flujo de referencia asociado se define como la cantidad anual de electricidad ($\text{kWh}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) y de producto agrícola ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) obtenida en AV_alta. Todos los inventarios de los distintos escenarios se escalan a esta unidad funcional, y los resultados de impacto se expresan por unidad funcional.

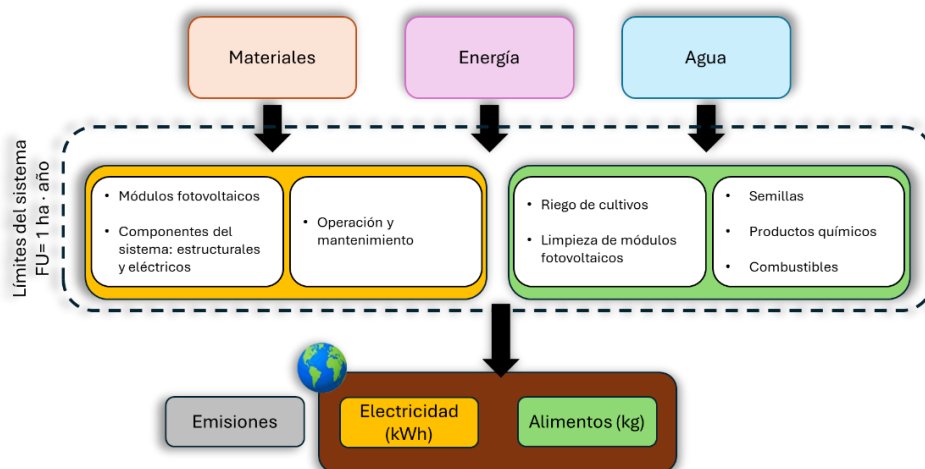


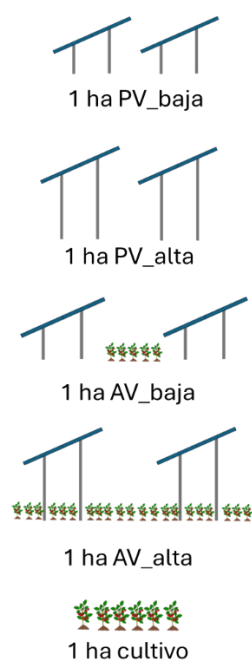
Figura 8. Límite del sistema para la producción combinada de electricidad y alimentos utilizando diseños agrivoltaicos.

De acuerdo con las recomendaciones de ISO 14044 y del ILCD, se han aplicado reglas de corte basadas en relevancia ambiental y contribución a la masa y energía totales. Se excluyen infraestructuras auxiliares con contribución esperada $<1\%$ al impacto en cambio climático (p. ej. edificaciones de la explotación, caminos internos) y consumos menores como desplazamientos del personal o uso de oficina. En el caso de los cultivos, no se modelan la fabricación y mantenimiento de la maquinaria agrícola, asumiendo que su contribución relativa por ha·año es marginal frente a los insumos de fertilizantes, agua de riego y energía.

A partir de estos procesos base se construyeron cuatro superprocesos mediante expansión del sistema, todos ellos ajustados para proporcionar el mismo paquete de funciones que 1 ha de sistema agrivoltaico elevado (AV_alta), es decir, una determinada cantidad de electricidad (kWh) y de producto agrícola (kg). Dado que la producción eléctrica por hectárea es la misma en todos los sistemas, la expansión del sistema se aplica únicamente sobre la función agrícola: en los escenarios que generan menos rendimiento de cultivo que AV_alta (PV_baja, PV_alta y AV_baja), se añaden las hectáreas necesarias de cultivo convencional hasta igualar la producción agrícola de referencia. El escenario AV_alta se representa únicamente con 1 ha de agrivoltaica elevada, sin hectáreas adicionales. Este enfoque corresponde a un sistema extendido o “basket of products” (Figura 9), en el que no se emplean créditos por productos evitados; en su lugar, cada alternativa se amplía hasta entregar el mismo conjunto de servicios (electricidad + alimentos), siguiendo las recomendaciones de ILCD/ISO 14044 y de trabajos recientes sobre ACV en sistemas agrivoltaicos (Krexner et al., 2024; Whiting et al., 2024). Este planteamiento corresponde a un ACV atribucional comparativo en contexto de decisión tipo A según ILCD, en el que se evita la asignación entre funciones energéticas y agrícolas mediante expansión del sistema y se garantiza la equivalencia funcional entre alternativas.

El dato base de producción corresponde al cultivo en campo abierto, mientras que la producción en condiciones agrivoltaicas se ve modificada por la sombra generada por los paneles. De este modo, la estimación de la producción de cultivo en los sistemas agrivoltaicos (AV_baja y AV_alta) se ha llevado a cabo utilizando el simulador ATERRA en el que se determina la sombra generada sobre el suelo a lo largo del período de cultivo y se recalcula el rendimiento del cultivo debido a esa falta de radiación en cada punto bajo el sistema fotovoltaico.

Procesos base (1 ha·año)



Paquete funcional objetivo
Electricidad
 2105000 kWh/año
Cultivo
 19481 kg/año
 Producción de 1 ha de AV_alta de cultivo de tomate

Escenarios comparados (superprocesos por sistema extendido)

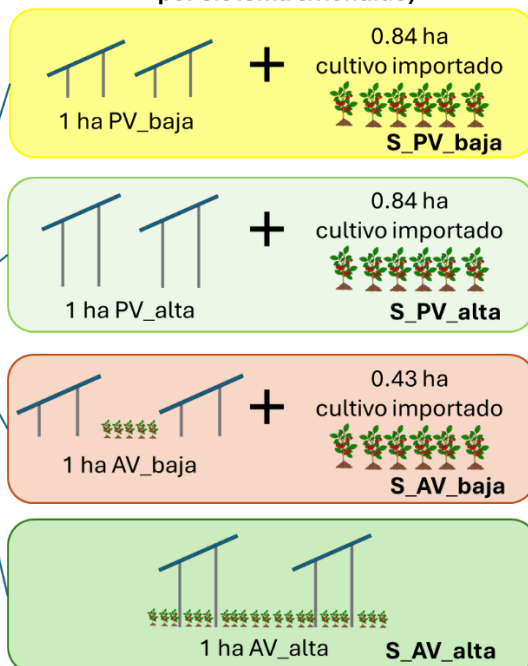


Figura 9. Representación del enfoque de sistema extendido. Datos de cultivo de tomate.

El estudio se ha implementado como un ACV atribucional en SimaPro (PRé Sustainability, Amersfoort, Países Bajos), empleando ecoinvent v3.10 como base de datos de referencia para los procesos de fondo y el método Environmental Footprint 3.1 como modelo de evaluación de impactos.

4. Análisis de inventario del ciclo de vida

En este apartado se describe el inventario de ciclo de vida (ICV) de los escenarios analizados, estructurado en dos subsistemas principales: la parte fotovoltaica (PV y AV) y la producción agrícola asociada. Todos los flujos de entrada y salida se expresan de forma coherente con la unidad funcional definida en el apartado 3.1, y se apoyan en una combinación de datos de primer plano (mediciones y consultas locales) y datos de fondo procedentes de bases de datos de referencia. A continuación, se detallan las fuentes de datos, los inventarios de infraestructura fotovoltaica y de cultivos, así como los modelos empleados para estimar emisiones asociadas al uso de fertilizantes y pesticidas.

Los inventarios de datos se han elaborado a partir de la base de datos ecoinvent v3.10 (*Ecoinvent*, s. f.), de informes y estadísticas de la Conselleria d'Agricultura, Pesca i Medi Natural del Govern de les Illes Balears, de datos primarios de agricultores y cooperativas locales, de documentación técnica y datos operativos facilitados por empresas locales de ingeniería e instalación fotovoltaica (presupuestos, memorias técnicas y rendimientos) y del simulador ATERRA desarrollado en el marco del proyecto. El tratamiento de las funciones múltiples (electricidad + producto agrícola) se ha basado en el enfoque de sistema extendido descrito en el apartado 1. Los inventarios que se presentan a continuación corresponden a los procesos base (1 ha·año de PV_baja, PV_alta, AV_baja, AV_alta y cultivo convencional), sin aplicar todavía la expansión del sistema. La igualación funcional entre escenarios se lleva a cabo en la fase de modelización en SimaPro, combinando linealmente estos procesos base y añadiendo, cuando es necesario, superficie adicional de cultivo convencional para que todas las alternativas proporcionen el mismo paquete de productos (electricidad + producto agrícola).

En la Tabla 2 se presenta el inventario de componentes y materiales utilizados para el montaje de los escenarios PV_Baja y PV_alta. Para estos escenarios se consideró una planta de 1 ha con la misma superficie de captación, equipada con el mismo tipo de módulos fotovoltaicos. En ambos casos, los paneles se modelaron con el conjunto de datos de producción de paneles fotovoltaicos (región "Rest of World") y el sistema eléctrico auxiliar incluye cableado genérico, tres inversores de 350 kW y un cuadro eléctrico, todos representados mediante mercados globales de cable y componentes eléctricos.

La diferencia principal entre ambos diseños se encuentra en la estructura de soporte. En el escenario PV_baja, la estructura combina perfiles de aluminio extruido con cantidades moderadas de acero galvanizado, complementados con pequeñas fracciones de acero inoxidable y acero conformado en frío. En el escenario PV_alta, con una estructura más alta y robusta, se elimina el uso de aluminio y se incrementa de forma notable la cantidad de acero galvanizado, manteniendo constantes las fracciones de acero inoxidable y de acero conformado en frío, además en el escenario PV_alta aumenta el uso de

cableado eléctrico. Por tanto, las discrepancias entre los impactos ambientales de PV_baja y PV_alta se deben fundamentalmente al distinto mix de materiales estructurales y de cableado, mientras que los componentes eléctricos y los módulos fotovoltaicos son equivalentes en ambos casos.

Tabla 2. Inventario de los componentes y materiales utilizados para el análisis de ciclo de vida de los escenarios PV_Bajo y PV_alto.

Componentes	PV_Baja	PV_Alta	Material	Conjunto de datos utilizados
Paneles solares (m ²)	4321.9	4321.9	Panel fotovoltaico	Producción de paneles fotovoltaicos, ROW
Cable (kg)	7869.7	7901.69	Cobre y plástico	Mercado de cable no especificado GLO
Inversor (u)	3	3	Plástico, cobre, acero y aluminio	Inversor, 350 kW, Solis SG-GU350k-EHV
Cuadro eléctrico (u)	1	1	Acero, cobre y plástico	Mercado de componentes eléctrico, GLO
Acero galvanizado (kg)	15036.8	38196.8	Acero	Producción de acero galvanizado por inmersión en caliente, ES
Acero inoxidable (kg)	107.2	107.2	Acero	Producción de placa de acero inoxidable, RNA
Acero en frío (kg)	614.4	614.4	Acero	Producción de acero, montantes y canales formados en frío
Aluminio (kg)	5107.2	-	Aluminio	Producción de aluminio por extrusión

Para completar la caracterización del sistema agrivoltaico, tras el inventario detallado de la parte fotovoltaica resulta necesario describir el rendimiento y el inventario asociados a los cultivos. Mientras que anteriormente nos hemos centrado en los materiales, la construcción y la operación de las instalaciones fotovoltaicas, ahora se abordará el subsistema agrícola, modelado de forma coherente con los mismos límites del sistema y la misma unidad funcional.

En la Tabla 3, se muestra el rendimiento de los siete cultivos seleccionados (cebolla, lechuga, melón, patata, pimiento, sandía y tomate) según su tolerancia a la sombra de acuerdo con la bibliografía, y su demanda en el sector hotelero de las Islas Baleares. El rendimiento (1 ha-año de cultivo) es el promedio de tres campañas basado en las estadísticas agrarias y pesqueras entre 2021 y 2023 (Consellería agricultura, pesca i alimentació. Institut de recerca i formació agroalimentaria i pesquera Illes Balears, 2021).

Tabla 3. Rendimientos medios anuales de los cultivos seleccionados en las Islas Baleares (Conselleria agricultura, pesca i alimentació. Institut de recerca i formació agroalimentaria i pesquera Illes Balears, 2021) y su tolerancia a la sombra de acuerdo con la bibliografía.

<i>CULTIVO</i>	<i>Rendimiento (kg/ha)</i>	<i>Tolerancia a la sombra</i>	<i>Referencia</i>
Cebolla	26956	BAJA	Kim et al. (2023),
Lechuga	24370	ALTA	Marrou et al. (2013)
Melón	14794	MEDIA	Pereira et al. (2011)
Patata	35900	MODERADA	Schulz et al. (2019)
Pimiento	18657	MEDIA	Díaz-Pérez et al. (2020)
Sandía	25179	MEDIA	Oduro Nkansah et al. (1996)
Tomate	23330	MEDIA	Mohammedi et al. (2023)

En la Tabla 4 se resumen los porcentajes de rendimiento medio mensual de cada cultivo en los escenarios AV_baja y AV_alta, respectivamente. El rendimiento de los cultivos en ambos escenarios se estimó mediante el simulador ATERRA, que combina ecuaciones derivadas del trabajo de Laub et al. (2022) con el porcentaje de radiación media mensual para calcular el rendimiento relativo medio mensual de cada cultivo bajo distintas condiciones de sombra.

Tabla 4. Rendimientos medios mensuales (%) de los cultivos seleccionados calculados mediante el simulador ATERRA.

	<i>Cabolla</i>		<i>Lechuga</i>		<i>Melón</i>		<i>Patata</i>		<i>Pimiento</i>		<i>Sandía</i>		<i>Tomate</i>	
MES	AV_ baja	AV_ alta	AV_ baja	AV_ alta	AV_ baja	AV_ alta	AV_ baja	AV_ alta	AV_ baja	AV_ alta	AV_ baja	AV_ alta	AV_ baja	AV_ alta
<i>enero</i>	27.7	64.7	67.1	100.8	49.0	85.9	56.7	92.5	49.0	85.9	49.0	85.9	49.0	85.9
<i>febrero</i>	41.8	67.5	77.7	101.1	61.6	87.3	68.5	93.4	61.6	87.3	61.6	87.3	61.6	87.3
<i>marzo</i>	61.8	69.9	85.9	100.1	75.1	87.7	79.7	93.1	75.1	87.7	75.1	87.7	75.1	87.7
<i>abril</i>	77.2	71.0	92.3	98.1	85.6	86.8	88.5	91.8	85.6	86.8	85.6	86.8	85.6	86.8
<i>mayo</i>	86.7	71.8	96.4	97.1	92.2	86.5	94.0	91.1	92.2	86.5	92.2	86.5	92.2	86.5
<i>junio</i>	90.3	72.2	98.2	96.6	94.8	86.3	96.3	90.8	94.8	86.3	94.8	86.3	94.8	86.3
<i>julio</i>	89.2	72.2	97.9	96.9	94.2	86.5	95.8	91.1	94.2	86.5	94.2	86.5	94.2	86.5
<i>agosto</i>	82.9	71.7	94.9	97.7	89.6	86.8	91.9	91.6	89.6	86.8	89.6	86.8	89.6	86.8
<i>septiembre</i>	70.1	70.4	89.0	99.0	80.5	87.2	84.1	92.4	80.5	87.2	80.5	87.2	80.5	87.2
<i>octubre</i>	51.7	68.8	82.2	101.0	68.6	87.8	74.4	93.6	68.6	87.8	68.6	87.8	68.6	87.8
<i>noviembre</i>	31.6	65.8	71.2	101.2	53.2	86.7	60.9	93.1	53.2	86.7	53.2	86.7	53.2	86.7
<i>diciembre</i>	26.6	64.0	65.7	100.3	47.7	85.3	55.3	91.9	47.7	85.3	47.7	85.3	47.7	85.3

Integrando el rendimiento medio mensual y los meses de siembra y recolección de cada cultivo se obtuvo un porcentaje de rendimiento global para cada cultivo y escenario, que se presenta en la Tabla 5. Para cada cultivo se consideraron los meses efectivos de ocupación del terreno (Tabla 6) y, en el caso de AV_baja y AV_alta, los porcentajes de superficie sembrada (44,1 % y 96,4 %, respectivamente).

Tabla 5. Porcentaje de rendimiento de los cultivos seleccionados en los escenarios AV_baja y AV_alta.

<i>CULTIVO</i>	<i>% rendimiento</i>	
	AV_baja	AV_alta
Cebolla	82.7	71.6
Lechuga	84.9	99.2
Melón	89.5	86.7
Patata	78.8	92.2
Pimiento	86.5	86.8
Sandía	89.5	86.7
Tomate	86.5	86.8

A partir de los rendimientos obtenidos para cada cultivo y escenario, se elaboró un inventario de insumos referido a la obtención de 1 kg de producto para cada uno de los cultivos considerados (Tabla 7). Este inventario incluye, entre otros, los consumos de agua de riego, fertilizantes, productos fitosanitarios, combustible para labores mecánicas, electricidad para bombeo, infraestructuras de riego y transportes asociados al suministro de insumos (plántulas, fertilizantes, pesticidas) y a la evacuación de la producción.

Tabla 6. Meses de ocupación del terreno por parte de los cultivos estudiados.

<i>CULTIVO</i>	<i>Meses de ocupación</i>
Cebolla	abril - septiembre
Lechuga	año completo
Melón	abril - septiembre
Patata	año completo
Pimiento	abril - octubre
Sandía	abril - septiembre
Tomate	abril - octubre

Los datos de entrada se definieron a partir de consultas directas con agricultores de la zona de estudio, con el fin de reflejar prácticas de manejo representativas a escala comercial, y se complementaron con información procedente de artículos científicos y fuentes bibliográficas especializadas en producción de cultivos hortícolas en condiciones mediterráneas (Amirahmadi et al., 2023; Arias et al., 2021; Chatzisyneon et al., 2017; Demir, 2023; Economou et al., 2023; Esmaeilzadeh et al., 2020; Martínez-Blanco et al., 2011; Martin-Gorriz et al., 2020; Romero-Gámez et al., 2014; Suppen-Reynaga et al., 2024). De este modo, el inventario por kg de producto integra tanto la experiencia práctica del sector como la evidencia disponible en la literatura, proporcionando una base sólida para el análisis de ciclo de vida de cada cultivo.

Tabla 7. Inventario de insumos necesarios para la producción de 1 kg de fruto de cada uno de los cultivos estudiados.

	Cebolla	Lechuga	Melón	Patata	Pimiento	Sandía	Tomate
Plántulas (unidad)	5.50E+00	2.10E+00	2.45E-01	4.01E-02	2.46E-01	1.03E-01	2.00E-01
Fertilizante nitrogenado (kg)	2.60E-03	1.98E-03	4.89E-03	5.54E-03	4.89E-03	9.79E-04	1.60E-02
Fertilizante potásico (kg)	1.30E-03	5.20E-03	5.40E-03	3.36E-03	5.40E-03	2.72E-04	2.10E-02
Fertilizante de fósforo (kg)	2.10E-03	2.20E-03	1.70E-03	5.63E-03	1.70E-03	7.18E-04	8.80E-04
Pesticida (kg)	1.90E-04	9.38E-01	3.26E-04	1.08E-03	3.25E-04	1.88E-05	6.90E-04
Agua (m ³)	2.58E-01	2.90E-02	1.05E-01	6.80E-02	9.00E-02	1.50E-02	6.50E-02
Electricidad (kWh)	1.11E-01	1.88E-03	1.23E-01	6.10E-02	1.23E-01	4.56E-03	4.42E-02
Transportes fertilizantes (t-km)	2.30E-03	3.50E-03	4.49E-03	7.27E-03	1.09E-02	3.25E-03	1.40E-02
Transportes pesticidas (t-km)	2.40E-04	4.82E-05	4.05E-04	2.71E-03	3.37E-04	2.35E-05	3.40E-03
Transporte plántulas (t-km)	4.90E-04	4.70E-03	5.49E-03	2.49E-05	7.34E-06	4.63E-03	2.49E-05
Transporte fruto (t-km)	7.00E-03	7.00E-03	7.00E-03	7.00E-03	7.00E-03	7.00E-03	7.00E-03
Diesel maquinaria agrícola (kg)	3.05E-02	1.06E-03	2.79E-01	2.32E-02	2.79E-01	5.37E-04	1.06E-01
Infraestructura riego (m ³)	2.58E-01	2.90E-02	1.05E-01	6.80E-02	9.00E-02	1.50E-02	6.50E-02

Las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de fertilizantes se estimaron siguiendo las Directrices del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (2006) y su actualización de 2019 para el sector suelos gestionados. Se aplicó el enfoque de nivel 1, que utiliza factores de emisión por defecto derivados de metaanálisis globales de mediciones de N₂O en suelos agrícolas, típicamente expresados como un porcentaje de N₂O–N emitido por unidad de nitrógeno aplicado (por ejemplo, un 1 % del N aportado en forma de fertilizante sintético u orgánico para emisiones directas, con factores adicionales para emisiones indirectas por volatilización y lixiviación). Este enfoque se considera apropiado en el

presente estudio porque es el método de referencia recomendado cuando no se dispone de factores específicos calibrados para cultivos, suelos y manejo locales (niveles 2 o 3), garantizando la coherencia con los inventarios nacionales y con otros estudios comparativos; y porque proporciona una estimación transparente y reproducible de las emisiones de N₂O asociadas a los aportes de nitrógeno (fertilizantes minerales, enmiendas orgánicas y residuos de cultivo), manteniendo una incertidumbre bien caracterizada según el rango de variación documentado por el IPCC.

Las emisiones asociadas al uso de pesticidas se modelizaron mediante PESTLCI 2.0 (Dijkman et al., 2012), un modelo de “segunda generación” específicamente desarrollado para estimar las fracciones de emisión de plaguicidas hacia aire, suelo agrícola, agua superficial y aguas subterráneas en el contexto del inventario de ciclo de vida de aplicaciones a campo. PESTLCI 2.0 integra propiedades fisicoquímicas de las sustancias (p. ej. coeficientes de partición, degradación), características del cultivo y del suelo, clima y modo de aplicación, proporcionando un reparto más detallado y consistente de los flujos de emisión que los enfoques simplificados de factores constantes. La elección de este modelo se justifica porque está ampliamente aceptado en la comunidad de ACV agrícola como herramienta de referencia para la cuantificación de emisiones de pesticidas a partir de dosis aplicadas, y porque permite una mejor coherencia entre el inventario de emisiones y las etapas posteriores de evaluación de impactos en toxicidad humana y ecotoxicidad.

En términos de calidad de datos, los inventarios agrícolas se basan principalmente en datos primarios obtenidos de agricultores y cooperativas de Mallorca, complementados con literatura específica para cultivos hortícolas mediterráneos, lo que garantiza una buena representatividad geográfica y tecnológica. Los rendimientos de referencia se han calculado a partir de las estadísticas agrarias y pesqueras 2021–2023 para las Illes Balears, de modo que el inventario refleja condiciones recientes del sector. Los procesos de fondo (producción de fertilizantes, electricidad, materiales estructurales, transportes, etc.) se modelan con ecoinvent v3.10, ampliamente utilizada en estudios de ACV. Esta combinación de datos primarios y secundarios proporciona una base robusta para el análisis, si bien persisten incertidumbres asociadas, entre otros factores, a la variabilidad interanual de rendimientos, a la falta de factores de emisión específicos de nivel 2 o 3 y a posibles simplificaciones en el modelado de prácticas agrícolas y emisiones de pesticidas.

5. Evaluación del impacto del ciclo de vida

Los potenciales impactos ambientales se evaluaron mediante el método Environmental Footprint 3.1 (adapted), versión 1.03, utilizando el conjunto de normalización y ponderación “EF 3.1 normalization and weighting set”, tal como está implementado en SimaPro. Este método corresponde a la versión más reciente de la metodología de Huella Ambiental desarrollada por la Comisión Europea para estudios de Product Environmental Footprint (PEF) y Organisation Environmental Footprint (OEF), y se recomienda como referencia para evaluaciones ambientales en el marco regulatorio europeo.

La elección de EF 3.1 se justifica porque: (i) proporciona un conjunto armonizado de factores de caracterización, normalización y ponderación validados por el Joint Research Centre (JRC), asegurando la coherencia con otras aplicaciones de PEF/OEF; (ii) cubre de forma consistente las principales dimensiones de impacto relevantes para sistemas agroalimentarios y energéticos (clima, calidad del aire, eutrofización, toxicidad, uso de agua y de recursos, etc.); y (iii) está ampliamente implementado en bases de datos y herramientas de ACV como ecoinvent y SimaPro, lo que facilita la comparabilidad con estudios previos.

En este trabajo se han utilizado principalmente los resultados de punto medio (midpoint) de EF 3.1 para analizar las contribuciones por categoría de impacto. La normalización y ponderación EF 3.1 solo se emplean de forma complementaria para obtener indicadores agregados (*single score*) en análisis de sensibilidad y comparación global entre escenarios, pero la interpretación detallada se basa en los indicadores de punto medio.

El método EF 3.1 incluye 16 categorías de impacto de punto medio. En el presente estudio se han considerado todas las categorías disponibles en SimaPro para EF 3.1 (*adapted*), que se listan a continuación, junto con sus unidades (Tabla 8).

Tabla 8. Categorías de impacto de punto medio del método EF 3.1.

Categorías de impacto	Unidades
Acidificación	mol H ⁺ eq.
Cambio climático	kg CO ₂ eq.
Ecotoxicidad	CTUe (Comparative toxic unit for ecosystems)
Material particulado	Casos de enfermedad
Eutrofización marina	kg N eq.
Eutrofización en agua dulce	kg P eq.
Eutrofización terrestre	mol N eq.
Toxicidad humana (cancer)	CTUh (Comparative toxic unit for humans)
Toxicidad humana (no-cancer)	CTUh (Comparative toxic unit for humans)
Radiación ionizante	kBq U-235 eq.
Uso del terreno	Pt.
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq.
Formación fotoquímica del ozono	Kg NMVOC eq. (Non-Methane Volatile Organic Compounds)

Uso de recursos fósiles	MJ
Uso de recursos minerales y metálicos	Kg Sb eq
Uso del agua	m3 de agua privativa

La evaluación del impacto del ciclo de vida se ha realizado siguiendo los pasos definidos en las normas ISO 14040/44. En primer lugar, se lleva a cabo la clasificación: todos los flujos del inventario (emisiones al aire, agua y suelo, así como consumos de recursos y energía) se asignan a una o varias categorías de impacto del método EF 3.1. Así, por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O) se asignan a la categoría Cambio climático; las emisiones de NH_3 , NO_x y SO_2 contribuyen a Acidificación y Eutrofización; los principios activos de los pesticidas se asignan a las categorías de Toxicidad humana y Ecotoxicidad del agua dulce; y el uso de agua de riego se asigna a Uso del agua. El resto de los flujos del inventario se tratan de forma análoga, de acuerdo con las reglas de clasificación del método EF 3.1. Estos pasos de clasificación se implementan en SimaPro a través del método EF 3.1, que contiene la asignación de flujos a categorías definida por la Huella Ambiental.

A continuación, el software aplica la etapa de caracterización: a cada flujo clasificado se le aplica el factor de caracterización EF 3.1 correspondiente, que lo convierte a las unidades del indicador de la categoría. Por ejemplo, las masas de CO_2 , CH_4 y N_2O se transforman a kg CO_2 equivalente mediante sus potenciales de calentamiento global a 100 años, y las emisiones de fósforo al agua se convierten a kg P equivalente en la categoría de Eutrofización en agua dulce. La suma de los productos “cantidad de flujo \times factor de caracterización” proporciona el resultado de punto medio para cada categoría de impacto, expresado por unidad funcional y para cada escenario modelizado.

A partir de esta figura, y para no sobrecargar la presentación de resultados, en las secciones siguientes se discuten en detalle principalmente los resultados del cultivo de tomate. Esta elección responde tanto a criterios metodológicos como de relevancia práctica. En primer lugar, el tomate es uno de los cultivos hortícolas de mayor relevancia económica y de mayor demanda en el sector hotelero de las Islas Baleares, por lo que resulta especialmente representativo del contexto de estudio. En segundo lugar, se trata de un cultivo con tolerancia intermedia a la sombra y con abundante información agronómica y ambiental disponible en la literatura, lo que permite construir un inventario robusto y comparar los resultados con estudios previos. Finalmente, los análisis realizados muestran que el patrón de contribuciones observado en el tomate, con una fuerte influencia del transporte y la electricidad en las categorías energéticas y de recursos, y un papel relevante de fertilizantes y pesticidas en eutrofización y toxicidad, es cualitativamente similar al de otros cultivos considerados. Por ello, el tomate

se utiliza como caso de estudio detallado y representativo del comportamiento ambiental de los sistemas agrivoltaicos analizados.

La Figura 9 presenta la descomposición porcentual de los impactos de los escenarios base fotovoltaicos y agrivoltaicos en las distintas categorías de punto medio de EF 3.1. En el gráfico superior se comparan los escenarios de estructura baja (PV_baja y AV_baja) y en el gráfico inferior los de estructura elevada (PV_alta y AV_alta). En cada caso, las barras apiladas muestran la contribución relativa de los distintos subsistemas (estructura, módulos fotovoltaicos, instalación, cableado, cuadro eléctrico, inversores, mantenimiento y cultivo) al impacto total del escenario considerado.

En los cuatro escenarios analizados se observa un patrón común: la mayor parte de la carga ambiental está asociada a la infraestructura fotovoltaica. La combinación “estructura + módulos PV” concentra más de la mitad de los impactos en la mayoría de categorías, especialmente en cambio climático, material particulado, formación fotoquímica del ozono, uso de recursos fósiles y uso de recursos minerales y metálicos, donde estas dos etapas llegan a dominar prácticamente la contribución total. Este resultado es coherente con el uso intensivo de acero y aluminio en las estructuras y con la elevada huella de los módulos c-Si en términos de energía incorporada y metales.

Los subsistemas eléctricos (cableado, cuadro eléctrico e inversores) muestran contribuciones moderadas, pero no despreciables, en particular en las categorías ligadas al uso de recursos minerales y metálicos, a la toxicidad humana y a la ecotoxicidad, donde la presencia de metales y componentes electrónicos introduce cargas adicionales. El mantenimiento presenta en general contribuciones bajas en todas las categorías, lo que indica que la fase de operación tiene un peso mucho menor que la fabricación inicial de los sistemas.

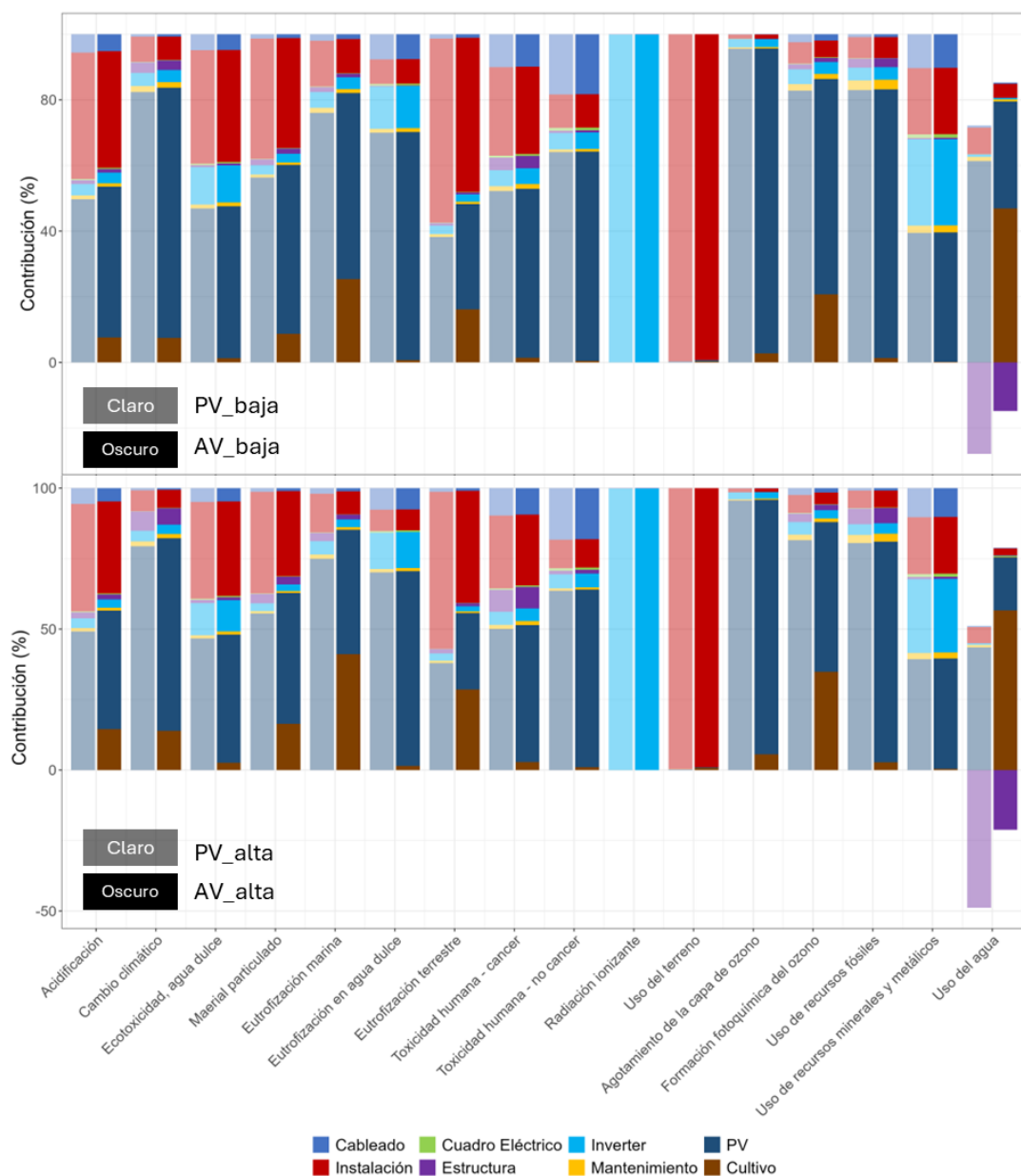


Figura 10. Descomposición porcentual de los impactos de los escenarios base fotovoltaicos (PV_baja y PV_alta) y agrivoltaicos (AV_baja y AV_alta) en las distintas categorías de EF 3.1.

La comparación entre PV_baja y AV_baja muestra el efecto de incorporar el subsistema de cultivo sobre una misma estructura de baja altura. En el escenario agrivoltaico (barras oscuras) aparece una fracción adicional asociada al cultivo, que incrementa la contribución de las categorías relacionadas con emisiones difusas al medio: eutrofización (terrestre y acuática), ecotoxicidad en agua dulce, toxicidad humana y uso del agua. Estas contribuciones reflejan fundamentalmente el uso de fertilizantes y pesticidas, así como el consumo de agua de riego y de energía para el bombeo. Como consecuencia, la proporción relativa atribuida a la estructura

y a los módulos disminuye ligeramente en AV_baja, aunque siguen siendo los principales contribuyentes en la mayoría de las categorías.

En la comparación entre PV_alta y AV_alta (panel inferior) se repite la misma tendencia, pero con una mayor dominancia de la estructura debido al aumento de la cantidad de acero galvanizado necesario para alcanzar la altura elevada. Esto se traduce en una fracción estructural especialmente alta en categorías como cambio climático, material particulado y uso de recursos fósiles y minerales. De nuevo, al pasar de PV_alta a AV_alta se añade la contribución del cultivo, que resulta particularmente relevante en eutrofización, ecotoxicidad, toxicidad humana y uso del agua, mientras que el peso relativo de la estructura y de los módulos se reduce en términos porcentuales.

En conjunto, se pone de manifiesto que, en todos los escenarios, la fabricación de la infraestructura fotovoltaica (estructura y módulos) es el principal motor de impactos en la mayoría de las categorías, mientras que el subsistema agrícola adquiere un papel dominante en los indicadores asociados a la contaminación difusa del suelo y del agua y al uso del agua. Los componentes eléctricos y las operaciones de mantenimiento contribuyen en menor medida, aunque su peso es más visible en las categorías relacionadas con el uso de recursos minerales y la toxicidad derivada de componentes electrónicos y metales. Este patrón es consistente con lo observado en ACV previos tanto de plantas fotovoltaicas en suelo (Frischknecht et al., 2015; Fthenakis & Kim, 2011) como de cultivos hortícolas mediterráneos (Martínez-Blanco et al., 2011; Martín-Gorriz et al., 2020; Romero-Gámez et al., 2014) y en los primeros estudios de ACV de sistemas agrivoltaicos (Agostini et al., 2021; Ali Abaker Omer et al., 2025; Krexner et al., 2024). Esta descomposición por procesos ayuda a identificar qué partes del sistema ofrecen mayor potencial de mejora en función del tipo de impacto considerado.

La Figura 10 muestra, a modo de ejemplo, la descomposición porcentual de los impactos ambientales del cultivo de tomate por procesos elementales: manejo del cultivo (plántulas, infraestructura, etc.), uso de fertilizantes, pesticidas, gasóleo para maquinaria, transporte y consumo de electricidad (principalmente para riego y bombeo). Cada barra apilada corresponde a una categoría de impacto de EF 3.1 y representa la contribución relativa de cada flujo al impacto total por unidad funcional (1ha-año).

En la mayoría de las categorías de impacto se identifican tres grandes grupos de procesos dominantes. En primer lugar, el consumo de diésel asociado a la maquinaria agrícola concentra una fracción muy elevada del impacto en acidificación, cambio climático, eutrofización marina y terrestre y en formación fotoquímica del ozono. Este patrón refleja el papel central de los combustibles fósiles en las emisiones atmosféricas y en el consumo de

energía primaria cuando se mecanizan la preparación del suelo, la plantación y las labores de manejo.

En segundo lugar, los fertilizantes y pesticidas dominan claramente las categorías de ecotoxicidad, eutrofización (agua dulce), toxicidad humana, uso del terreno, agotamiento de la capa de ozono y uso de recursos fósiles y contribuyen de forma relevante a algunas categorías de radiación ionizante y uso de recursos minerales y metálicos. Ello responde a las pérdidas de nitrógeno y fósforo hacia el medio (lixiviación, escorrentía, emisiones de NH_3 y N_2O), así como a los impactos asociados a la fabricación de fertilizantes minerales y pesticidas. En tercer lugar, la electricidad (para bombeo y otros consumos eléctricos del sistema de riego) aparece como contribuyente dominante en radiación ionizante, y comparte protagonismo con los fertilizantes y pesticidas en toxicidad humana (no cáncer) y en el uso de recursos fósiles y minerales y metálicos. Además, el proceso de riego y cultivo (uso de agua) es responsable prácticamente de la totalidad del impacto en la categoría Uso del agua, material particulado y en ecotoxicidad lo que pone de manifiesto la importancia del consumo hídrico en este cultivo bajo condiciones mediterráneas. El bloque etiquetado como transporte presenta, en comparación, contribuciones más moderadas y repartidas, aunque sigue siendo ambientalmente relevantes en varias categorías.

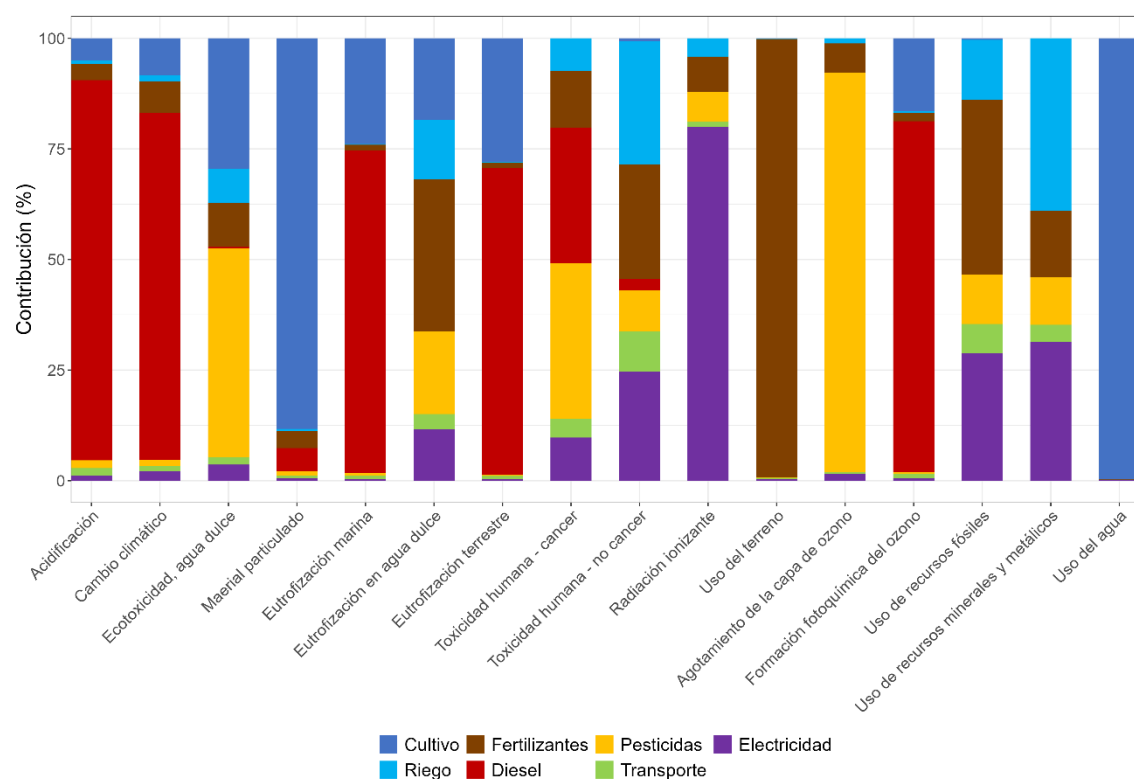


Figura 11. Descomposición porcentual de los impactos del escenario solo cultivo (tomate) en las distintas categorías de EF 3.1.

Este patrón de contribuciones, con la energía (diésel y electricidad) y los insumos de fertilización y fitosanitarios como principales responsables de las categorías energéticas, de emisiones atmosféricas, eutrofización y toxicidad, es consistente con lo descrito en numerosos ACV previos de tomate y otros cultivos hortícolas (Hospido et al., 2009; Martínez-Blanco et al., 2011; Martin-Gorriz et al., 2020; Romero-Gámez et al., 2014), lo que refuerza la plausibilidad de los inventarios y resultados obtenidos en este trabajo.

6. Interpretación de resultados

6.1. Resultados de la evaluación de impacto de los superprocesos

La Tabla 9 recoge los impactos de punto medio totales de los cuatro superprocesos construidos mediante expansión del sistema, expresados por unidad funcional (paquete combinado de electricidad y producto agrícola equivalente a 1 ha·año de AV_alta). El escenario 1 corresponde a un parque fotovoltaico de estructura baja sobre suelo agrícola sin cultivo (S_PV_baja); el Escenario 2 representa un parque fotovoltaico de estructura elevada sin cultivo (S_PV_alta); el escenario 3, un sistema agrivoltaico de estructura baja con cultivo entre filas (S_AV_baja); y el escenario 4, un sistema agrivoltaico de estructura elevada con cultivo en toda la superficie (S_AV_alta).

Tabla 9. Impactos totales de los cuatro superprocesos construidos mediante expansión del sistema (Unidades descritas en la Tabla 8).

CATEGORÍA DE IMPACTO	S_PV_baja	S_PV_alta	S_AV_baja	S_AV_alta
Acidificación	656	662	652	654
Cambio climático	69944	72378	70443	73330
Ecotoxicidad, agua dulce	719309	723038	720538	725442
Material particulado	0.0066	0.0067	0.0067	0.0069
Eutrofización marina	131.9	133.7	133.9	137.3
Eutrofización en agua dulce	32.807	32.757	32.829	32.798
Eutrofización terrestre	2215	2235	2240	2279
Toxicidad humana - cancer	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
Toxicidad humana - no cancer	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018
Radiación ionizante	53663991	53682960	53664012	53683002
Uso del terreno	59258593	59262690	59295394	59335934
Agotamiento de la capa de ozono	0.00547	0.00547	0.00549	0.00552
Formación fotoquímica del ozono	397	403	401	410
Uso de recursos fósiles	818334	842561	818639	842986
Uso de recursos minerales y metálicos	3.835	3.849	3.835	3.851
Uso del agua	127689	101830	138428	123232

En términos absolutos, las magnitudes de impacto son del mismo orden entre escenarios: los valores de cambio climático se sitúan alrededor de $7 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq por unidad funcional, la ecotoxicidad en agua dulce en torno a $7 \cdot 10^5$ CTUe, el uso del terreno en $\approx 5,9 \cdot 10^6$ Pt y el uso del agua en $1,0\text{--}1,4 \cdot 10^5$ m³ de agua. El resto de las categorías presenta valores igualmente cercanos entre alternativas, lo que sugiere que las diferencias ambientales entre configuraciones se sitúan en un rango relativamente estrecho.

6.2. Comparación relativa entre escenarios

Mientras que la Tabla 9 permite comparar los impactos absolutos de los superprocesos, para analizar mejor las diferencias relativas entre alternativas se ha calculado el cambio porcentual respecto a un sistema de referencia. Dado que en la actualidad la opción más habitual en el contexto balear es la ocupación de suelos agrícolas con parques fotovoltaicos de estructura baja sin producción de cultivos, el Escenario 1 (S_PV_baja) se toma como sistema de referencia para el análisis comparativo. Los impactos de los escenarios 2–4 se expresan, por tanto, como variación porcentual respecto a este uso convencional del terreno. Para cada categoría k y escenario i , el porcentaje de cambio se calculó como se indica en la ecuación 1.

$$\Delta\%_{i,k} = \frac{I_{i,k} - I_{ref,k}}{I_{ref,k}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde $I_{i,k}$ es el valor del indicador de impacto del escenario i y $I_{ref,k}$ el valor correspondiente al Escenario 1 en la misma categoría. De este modo, valores positivos indican un incremento del impacto respecto al parque fotovoltaico de estructura baja sin cultivo, mientras que valores negativos representan una reducción del impacto respecto a dicha referencia.

La Figura 11 muestra el cambio porcentual de cada categoría de impacto de los Escenarios 2, 3 y 4 respecto al Escenario 1 (S_PV_baja), excluyendo la categoría uso del agua (representada separadamente en la Figura 12 debido a sus mayores variaciones). En general, las diferencias entre escenarios se sitúan en un rango relativamente moderado, típicamente entre 0 y 5 % en la mayoría de las categorías.

El Escenario 2 (S_PV_alta) presenta aumentos sistemáticos de impacto respecto a la referencia en prácticamente todas las categorías, con incrementos del orden de 1–4 %. Las mayores desviaciones se observan en cambio climático, toxicidad humana (cáncer) y uso de recursos fósiles, donde el Escenario 2 supera al escenario 1 en aproximadamente un 3–4 %. En Eutrofización en agua dulce, radiación ionizante y uso del terreno, las diferencias son muy pequeñas e incluso ligeramente negativas, de modo que la estructura elevada sin cultivo comporta un ligero aumento del impacto global respecto al parque fotovoltaico de estructura baja.

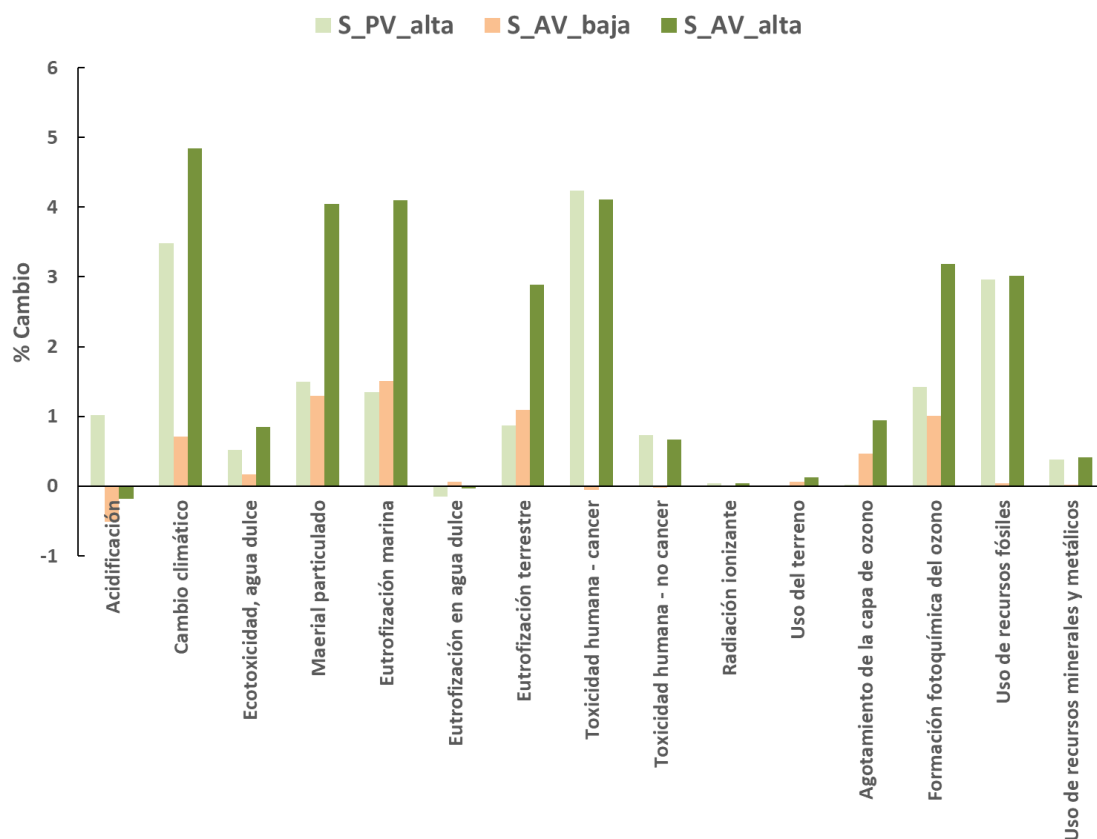


Figura 12. Cambio porcentual de cada categoría de impacto de los escenarios 2,3 y 4 respecto al escenario 1.

El Escenario 3 (S_AV_baja) muestra valores muy próximos a los del Escenario 1 en la mayoría de categorías, con variaciones generalmente inferiores al 1,5 %. Se observan ligeros aumentos en Material particulado, Eutrofización marina, Eutrofización terrestre, Agotamiento de la capa de ozono y Formación fotoquímica del ozono, mientras que Acidificación presenta una leve reducción. En conjunto, el comportamiento ambiental del sistema agrivoltaico de estructura baja, una vez corregido para ofrecer el mismo paquete de funciones, resulta muy similar al de la ocupación fotovoltaica convencional del suelo.

El Escenario 4 (S_AV_alta) presenta los mayores incrementos relativos en varias categorías: en Cambio climático, Material particulado, Eutrofización marina, Eutrofización terrestre, Toxicidad humana (cáncer), Formación fotoquímica del ozono y uso de recursos fósiles, los impactos aumentan en torno a un 3-5 % respecto al Escenario 1. Mientras que, en Acidificación, Eutrofización en agua dulce, Radiación ionizante, uso del terreno y uso de recursos minerales y metálicos las diferencias son muy reducidas e incluso negativas. Esto indica que, desde la perspectiva de estos indicadores, el sistema agrivoltaico elevado con cultivo completo comporta una ligera

penalización ambiental frente al parque fotovoltaico de estructura baja, aunque dentro de un margen cuantitativamente muy moderado.

La categoría Uso del agua presenta variaciones más acusadas y se ha representado de forma separada en la Figura 12. En este caso, el Escenario 2 (S_PV_alta) muestra una reducción de aproximadamente un 20 % del uso de agua respecto al Escenario 1 (S_PV_baja), mientras que el Escenario 3 (S_AV_baja) implica un incremento cercano al 8 %. El Escenario 4 (S_AV_alta) se sitúa ligeramente por debajo de la referencia, con una reducción del orden del 3 %. Estas diferencias reflejan la distinta superficie de cultivo e intensidad de riego necesaria en cada escenario para proporcionar la misma cantidad de producto agrícola: el agrivoltaico de estructura baja requiere una mayor superficie irrigada y, por tanto, un mayor uso de agua por unidad funcional, mientras que la configuración fotovoltaica elevada sin cultivo y el agrivoltaico elevado necesitan menos superficie de cultivo convencional adicional para alcanzar el rendimiento agrícola de referencia.

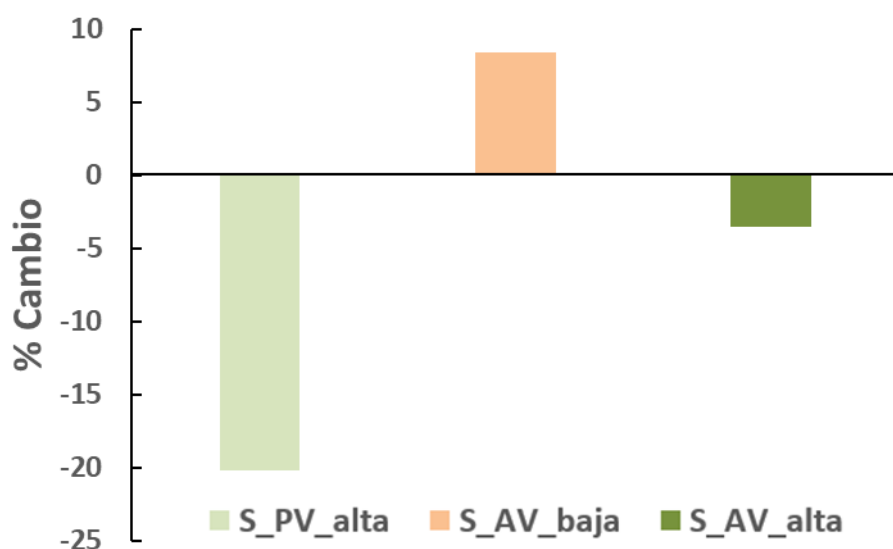


Figura 13. Cambio porcentual de la categoría Uso del agua de los escenarios 2,3 y 4 respecto al escenario 1.

En conjunto, los resultados muestran que, una vez igualadas las funciones energéticas y agrícolas, las cuatro configuraciones analizadas presentan impactos globales relativamente similares, con diferencias generalmente inferiores al 5 % en la mayoría de las categorías de EF 3.1. La estructura elevada (Escenario 2) y el agrivoltaico elevado (Escenario 4) tienden a incrementar ligeramente los impactos en categorías asociadas al uso de materiales y energía, mientras que el agrivoltaico de estructura baja (Escenario 3) se comporta de forma muy próxima al sistema de referencia. La categoría Uso del agua constituye la principal excepción, con variaciones más marcadas entre escenarios, lo que sugiere que la gestión del riego y la superficie cultivada es un factor clave en la evaluación ambiental de

alternativas agrivoltaicas frente a la ocupación fotovoltaica convencional del suelo agrícola.

6.3. Análisis de incertidumbre: simulación Monte Carlo

Además de los resultados deterministas presentados en los apartados anteriores, se llevó a cabo un análisis de incertidumbre con el fin de evaluar la robustez de las diferencias entre escenarios. El análisis de incertidumbre permite cuantificar cómo afectan las desviaciones asociadas a los datos de inventario y a los parámetros del modelo a los resultados de un estudio de ciclo de vida, proporcionando intervalos de variación y medidas de confianza en las comparaciones.

En este trabajo, la incertidumbre se analizó mediante simulación Monte Carlo en SimaPro. En cada iteración, el modelo de ACV se ejecuta introduciendo variaciones aleatorias dentro de los rangos de incertidumbre especificados, tanto en los procesos de fondo (según la información de incertidumbre incorporada en ecoinvent) como en los parámetros de primer plano definidos por el usuario, generando una distribución estadística de resultados para cada categoría de impacto y escenario. De este modo, en lugar de obtener un único valor puntual por categoría, se obtiene un rango de resultados posibles que refleja la variabilidad de los inventarios y de los parámetros de entrada. Se realizaron dos tipos complementarios de análisis:

- **Análisis de sensibilidad:** Cuando se aplica el análisis de incertidumbre a un único escenario, el objetivo es cuantificar cómo afectan las incertidumbres de los inventarios y de los parámetros al resultado final. Cada iteración del Monte Carlo utiliza valores ligeramente distintos para los flujos del inventario y para los parámetros del modelo (si se ha definido una desviación), obteniendo así una dispersión de resultados. Este análisis permite evaluar si los resultados del escenario son estables y robustos frente a la incertidumbre de los datos, o si la variabilidad es suficientemente alta como para afectar a las conclusiones del estudio.
- **Análisis de incertidumbre para comparar dos escenarios:** Cuando se comparan dos escenarios (A y B) mediante una simulación Monte Carlo conjunta, en cada iteración se calculan los impactos de A y B usando la misma realización aleatoria de los inventarios y parámetros inciertos, de modo que la comparación refleje principalmente la diferencia estructural entre escenarios y no el efecto del ruido aleatorio. Esto permite determinar en qué porcentaje de las iteraciones un escenario presenta un impacto mayor que el otro, y viceversa, y evaluar si la comparación es consistente o depende fuertemente de la incertidumbre. Cuando esta proporción se sitúa muy próxima al 50 %,

indica que no existe una diferencia concluyente entre ambos escenarios; por el contrario, porcentajes claramente superiores al 50 % muestran que la comparación es robusta y estadísticamente consistente, incluso teniendo en cuenta la variabilidad de los datos. Este enfoque proporciona una visión probabilística que complementa la comparación determinista basada en valores puntuales.

Además de la incertidumbre asociada a los procesos de fondo de la base de datos ecoinvent (tal y como está implementada en SimaPro), los parámetros de primer plano se modelizaron mediante distribuciones normales alrededor de sus valores medios:

- Vida útil de los sistemas fotovoltaicos, con media 30 años y desviación estándar 2,5 años, para reflejar la variabilidad razonable en la duración de los equipos.
- Rendimiento de cultivo, con una desviación estándar relativa del 5 % respecto al valor medio, representando la variabilidad interanual de producción agrícola.
- Área de cultivo efectiva, con desviación estándar relativa del 3 %, asociada a posibles cambios en el porcentaje real de superficie ocupada.
- La producción de cultivo objetivo se fijó en 100 unidades (kg), de modo que todas las simulaciones cumplen el mismo paquete funcional de electricidad + producto agrícola.

Para cada escenario individual y para cada par de escenarios comparados se ejecutaron 1000 iteraciones de Monte Carlo, lo que proporciona un tamaño de muestra suficiente para caracterizar la distribución de resultados y estimar probabilidades de dominancia entre alternativas.

6.3.1. Análisis de sensibilidad

Las Tablas 10 (Escenarios 1, S_PV_baja y 2, S_PV_alta) y 11 (Escenarios 3, S_AV_baja y 4, S_AV_alta) recogen los resultados del análisis de incertidumbre para los cuatro escenarios, expresados como valor medio y percentiles 2,5–97,5 % (IC95 %) de las simulaciones de Monte Carlo. El valor medio representa la estimación central del impacto cuando se consideran simultáneamente las incertidumbres de los inventarios de ecoinvent y de los parámetros de primer plano (vida útil, rendimiento de cultivo, área efectiva de cultivo y producción de cultivo). El IC2,5 % y el IC97,5 % indican el rango dentro del cual cae aproximadamente el 95 % de los resultados de las 1000 simulaciones; intervalos estrechos alrededor de la media señalan una incertidumbre relativamente baja, mientras que intervalos amplios reflejan una mayor dispersión de posibles resultados.

Los resultados de Monte Carlo indican que los inventarios de primer plano y de fondo generan resultados razonablemente robustos en la mayoría de categorías de impacto. Para prácticamente todas las categorías, excepto Ecotoxicidad en agua dulce, Toxicidad humana (cáncer), Eutrofización terrestre y Uso del agua, el valor medio de las simulaciones es muy próximo al valor determinista y el intervalo de confianza del 95 % se mantiene dentro de un rango relativamente acotado (del orden de $\pm 20\text{--}30\%$ alrededor de la media). Este patrón se reproduce en los cuatro escenarios, lo que indica que, aun incorporando la incertidumbre de los datos de ecoinvent y de los parámetros clave del modelo, las estimaciones de impacto por categoría son estables y las conclusiones cualitativas obtenidas a partir del inventario no dependen críticamente de valores puntuales aislados.

Tabla 10. Resultados del análisis de incertidumbre (media e intervalos de confianza (IC)) de los escenarios 1 (S_PV_baja) y 2 (S_PV_alta) (sistemas fotovoltaicos sin cultivo simultáneo) para cada una de las categorías de impacto (unidades descritas en la Tabla 8)

CATEGORÍA	S_PV_baja			S_PV_alta		
	Media	IC2,5%	IC97,5%	Media	IC2,5%	IC97,5%
Acidificación	679	529	882	685	543	895
Cambio climático	7.3E+04	5.3E+04	1.0E+05	7.5E+04	5.6E+04	1.0E+05
Ecotoxicidad, agua dulce	6.6E+05	-1.3E+07	1.3E+07	8.2E+05	-1.2E+07	1.4E+07
Material particulado	32.7	15.1	69.7	32.7	14.7	67.6
Eutrofización marina	144	117	179	145	118	181
Eutrofización en agua dulce	2350	1790	3110	2370	1850	3090
Eutrofización terrestre	-4.9E-05	-4.2E-03	3.8E-03	9.5E-05	-4.2E-03	4.3E-03
Toxicidad humana (cáncer)	-0.010	-0.991	0.852	0.013	-0.939	0.931
Toxicidad humana (no cáncer)	5.37E+07	4.96E+07	5.84E+07	5.38E+07	4.97E+07	5.86E+07
Radiación ionizante	5.93E+07	5.91E+07	5.96E+07	5.93E+07	5.91E+07	5.97E+07
Uso del terreno	5.5E-03	3.5E-03	8.6E-03	5.6E-03	3.7E-03	8.2E-03
Agotamiento de la capa de ozono	6.9E-03	5.0E-03	1.1E-02	6.9E-03	5.1E-03	1.1E-02
Formación fotoquímica del ozono	428	338	546	432	347	544
Uso de recursos fósiles	8.3E+05	5.6E+05	1.3E+06	8.5E+05	5.7E+05	1.3E+06
Uso de recursos minerales y metálicos	3.83	2.88	5.14	3.85	2.88	5.06
Uso del agua	2.9E+05	-2.4E+07	2.0E+07	-2.9E+05	-2.5E+07	2.0E+07

Las categorías de Ecotoxicidad en agua dulce y Toxicidad humana del método EF 3.1 se basan en modelos de destino y efecto muy complejos y en factores de caracterización con incertidumbres intrínsecamente elevadas. A ello se añade que los flujos que alimentan estas categorías en los inventarios de ecoinvent (emisiones de pesticidas, metales traza y otras sustancias tóxicas) presentan desviaciones estándar grandes. En estas condiciones, pequeñas variaciones absolutas en los flujos de emisión se traducen en una dispersión relativa muy alta de los resultados en CTUe y CTUh. Algo similar ocurre en Toxicidad humana y en Eutrofización terrestre, donde los valores medios de impacto son muy reducidos; cuando la media se aproxima a cero, cualquier desviación estándar moderada hace que el cociente SD/media, y por tanto el coeficiente de variación (CV), adopte valores numéricamente desproporcionados, de modo que el CV deja de ser un indicador útil de la calidad del resultado. En la categoría Uso del agua (m³ de agua) confluyen consumos de agua en distintos procesos con factores de privación muy heterogéneos. La combinación de contribuciones positivas y negativas, junto con la incertidumbre asociada a los inventarios de riego y a los factores regionales del método EF, da lugar a medias relativamente moderadas, pero desviaciones estándar muy altas, lo que vuelve a inflar el CV.

Tabla 11. Resultados del análisis de incertidumbre (Promedio y intervalos de confianza (IC)) de los escenarios 3 (S_AV_baja) y 4 (S_AV_alta) (sistemas agrivoltaicos) para cada una de las categorías de impacto.

CATEGORÍA	S_AV_baja			S_AV_alta		
	Media	IC2,5%	IC97,5%	Media	IC2,5%	IC97,5%
Acidificación	663	517	879	655	503	870
Cambio climático	7.1E+04	5.3E+04	9.8E+04	7.3E+04	5.4E+04	1.1E+05
Ecotoxicidad, agua dulce	4.9E+05	-1.2E+07	1.3E+07	8.5E+05	-1.2E+07	1.4E+07
Material particulado	33.1	15.1	70.5	32.8	14.3	74.5
Eutrofización marina	140	114	177	137	111	176
Eutrofización en agua dulce	2310	1770	3080	2280	1760	3070
Eutrofización terrestre	-5.25E-05	-3.91E-03	4.14E-03	5.30E-05	-3.89E-03	4.45E-03
Toxicidad humana (cáncer)	-1.72E-02	-9.35E-01	9.19E-01	9.67E-03	-9.18E-01	9.79E-01
Toxicidad humana (no cáncer)	5.4E+07	5.0E+07	5.8E+07	5.4E+07	5.0E+07	5.9E+07
Radiación ionizante	5.9E+07	5.9E+07	6.0E+07	5.9E+07	5.9E+07	6.0E+07
Uso del terreno	5.5E-03	3.5E-03	8.2E-03	5.5E-03	3.4E-03	8.6E-03
Agotamiento de la capa de ozono	6.8E-03	5.0E-03	1.0E-02	6.9E-03	5.0E-03	1.1E-02
Formación fotoquímica del ozono	417	333	527	409	320	536

Uso de recursos fósiles	8.2E+05	5.5E+05	1.3E+06	8.4E+05	5.6E+05	1.3E+06
Uso de recursos minerales y metálicos	3.83	2.88	5.00	3.83	2.84	5.21
Uso del agua	1.6E+05	-2.3E+07	1.9E+07	-1.9E+05	-2.4E+07	2.0E+07

La Figura 13 muestra el coeficiente de variación (CV, %) obtenido en el análisis de incertidumbre de Monte Carlo para cada categoría de impacto y para los cuatro escenarios estudiados. Cada barra horizontal representa el CV de una categoría en un escenario concreto, de modo que se visualiza simultáneamente la magnitud de la incertidumbre relativa y su patrón común entre configuraciones. En la Figura se incluyen únicamente las categorías con un comportamiento estadístico razonable; Ecotoxicidad en agua dulce, Eutrofización terrestre, Toxicidad humana (cáncer) y Uso del agua son excluidas debido a que presentan CV extremadamente elevados, tal como se ha comentado anteriormente.

Desde un punto de vista metodológico, el CV se interpreta como una medida de la dispersión relativa de los resultados de Monte Carlo respecto a su media. A falta de umbrales normativos estrictos, en ACV suele considerarse de forma orientativa que valores de CV < 10 % indican una incertidumbre baja y, por tanto, resultados muy robustos; valores entre 10–30 % corresponden a una incertidumbre moderada pero aceptable, en la que las conclusiones cualitativas son en principio sólidas y valores > 30–40 % señalan categorías con alta incertidumbre relativa, que deben interpretarse con mayor cautela.

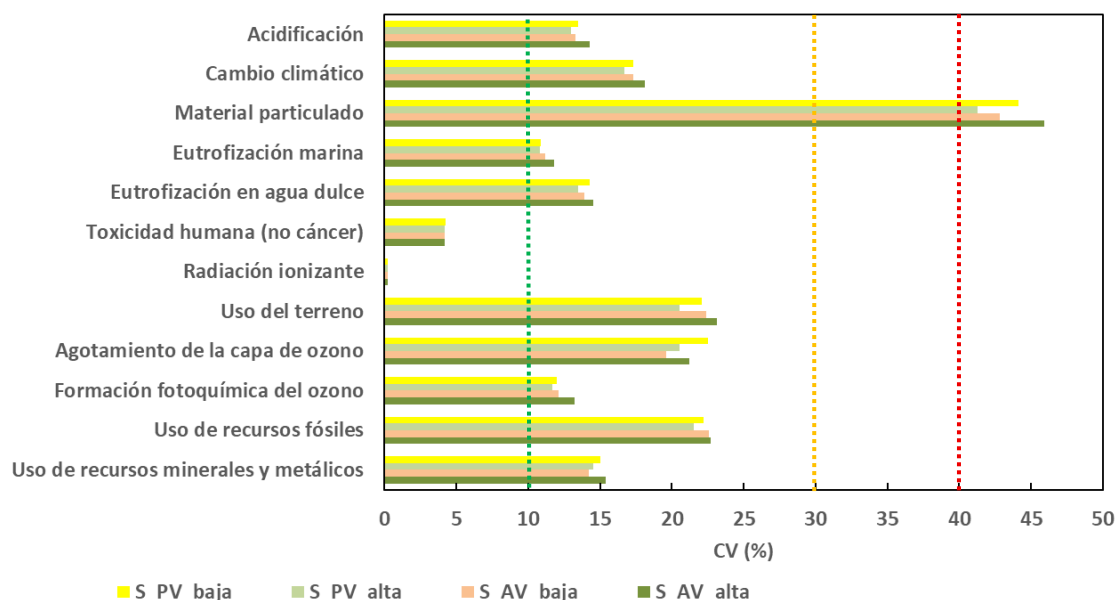


Figura 14. Coeficientes de variación (%) de categorías de impacto para cada uno de los escenarios.

En la Figura 14 se observa, en primer lugar, que el patrón de CV es muy similar entre escenarios, lo que indica que la estructura de incertidumbre está dominada por los procesos de fondo (inventarios de ecoinvent y factores de caracterización del método EF 3.1) más que por diferencias específicas de cada configuración. La Radiación ionizante presenta CV muy próximos a cero en todos los escenarios, lo que refleja una gran estabilidad del resultado: el indicador está dominado por el mix eléctrico de fondo y por inventarios con incertidumbre relativamente reducida. La Toxicidad humana (no cáncer) muestra CV próximos al 5 %, situándose en el límite inferior del rango de incertidumbre moderada. En estas categorías, los resultados pueden considerarse muy robustos desde el punto de vista estadístico. La categoría de Material particulado presenta los CV más elevados, con valores que rondan el 40–45 % en los diferentes escenarios. En estos casos, las emisiones que alimentan el indicador (principalmente emisiones atmosféricas asociadas al transporte, al uso de combustible fósil y a determinados procesos de fondo) presentan una incertidumbre relativamente elevada en ecoinvent, lo que se traduce en una dispersión proporcionalmente mayor en los resultados de Monte Carlo. Aunque las medias obtenidas siguen siendo útiles para comparar órdenes de magnitud entre escenarios, las diferencias pequeñas entre configuraciones deben interpretarse con mayor prudencia, ya que se sitúan dentro de un rango de variabilidad relativamente amplio. En las categorías de impacto restantes los CV de los cuatro escenarios se sitúan mayoritariamente entre ~10 y 25 %. Esto indica que las simulaciones de Monte Carlo generan una dispersión relativa acotada en torno a la media: los valores puntuales pueden variar en un ± 20 –25 %, pero la señal es suficientemente clara como para considerar que las conclusiones cualitativas (qué escenarios presentan impactos mayores o menores, y el orden de magnitud de estos) son razonablemente robustas. Además, la similitud de CV entre escenarios sugiere que la comparación entre ellos no está sesgada por diferencias de calidad en los datos, sino que todos comparten un nivel de incertidumbre comparable.

En conjunto, para la mayoría de las categorías de EF 3.1 consideradas (especialmente cambio climático, acidificación, eutrofización en agua dulce, uso del terreno y uso de recursos fósiles y minerales), los resultados del ACV presentan una incertidumbre relativa moderada y las conclusiones cualitativas pueden considerarse robustas. Por el contrario, las categorías con CV muy altos (material particulado, ecotoxicidad, toxicidad humana, eutrofización terrestre y uso del agua) muestran que los inventarios y factores de caracterización asociados son mucho más inciertos; en estas categorías los resultados son informativos como orden de magnitud, pero las comparaciones finas entre escenarios deben tratarse como indicativas y no como diferencias firmes.

6.3.2. Análisis de incertidumbre para comparar dos escenarios

El análisis de incertidumbre para comparar dos escenarios se ha centrado en las comparaciones con el sistema de referencia (Escenario 1 vs. Escenario 2, 3 y 4, respectivamente) y en las comparaciones entre los dos escenarios agrivoltaicos (Escenario 3 y 4). Los resultados del análisis de incertidumbre aplicado a la comparación entre un escenario A y un escenario B pueden representarse mediante *gráficos de mariposa*. Para cada categoría de impacto ambiental, el gráfico muestra el porcentaje de iteraciones del análisis Monte Carlo en las que un escenario presenta un impacto mayor o menor que el otro. Estas probabilidades equivalen a un nivel de confianza del 95% en la comparación.

Los valores situados en el lado izquierdo de los gráficos indican el porcentaje de iteraciones en las que el escenario de referencia (Escenario 1) presenta un impacto inferior al del otro escenario (Escenario 2, 3 o 4, respectivamente), mientras que los valores del lado derecho muestran el porcentaje de casos en los que el escenario de referencia presenta un impacto superior. De esta forma, cada categoría se representa mediante dos barras simétricas que permiten visualizar rápidamente la dirección y la intensidad de las diferencias entre los escenarios.

Las líneas verticales discontinuas corresponden al valor de igual probabilidad (50 %), que sirve como referencia para interpretar los resultados. Cuando las barras de una categoría se sitúan muy próximas a este valor, significa que la diferencia entre los dos escenarios no es concluyente, ya que ambos escenarios muestran desempeños similares bajo la variabilidad considerada. Por el contrario, cuando las barras se alejan claramente del 50 %, existe una mayor robustez y consistencia en la comparación, indicando una preferencia clara por uno de los escenarios.

En conjunto, este gráfico permite evaluar simultáneamente la dirección de la diferencia ambiental entre los dos escenarios comparados y la confianza asociada a esa diferencia, proporcionando una herramienta visual muy eficaz para interpretar resultados de análisis de sensibilidad e incertidumbre en estudios de ciclo de vida.

Comparación Escenario 1 (S_PV_baja) vs Escenario 2 (S_PV_alta)

La Figura 14 presenta los resultados del análisis de incertidumbre para la comparación entre el Escenario 1 (parque fotovoltaico de estructura baja sin cultivo) y el Escenario 2 (parque fotovoltaico de estructura elevada sin cultivo). Para cada categoría de impacto, la simulación Monte Carlo conjunta calcula, en cada iteración, los impactos de ambos escenarios bajo la misma realización aleatoria de los parámetros e inventarios y registra cuál de los dos presenta el valor más bajo. Las barras amarillas representan el porcentaje de iteraciones en las que el Escenario 1 presenta un impacto inferior al Escenario

2 (Escenario 1 < Escenario 2), mientras que las barras verdes recogen el porcentaje de iteraciones en las que el Escenario 1 es igual o peor (Escenario 1 \geq Escenario 2). La línea vertical situada en el 50 % marca el umbral a partir del cual puede considerarse que existe una preferencia estadísticamente consistente por uno de los escenarios.

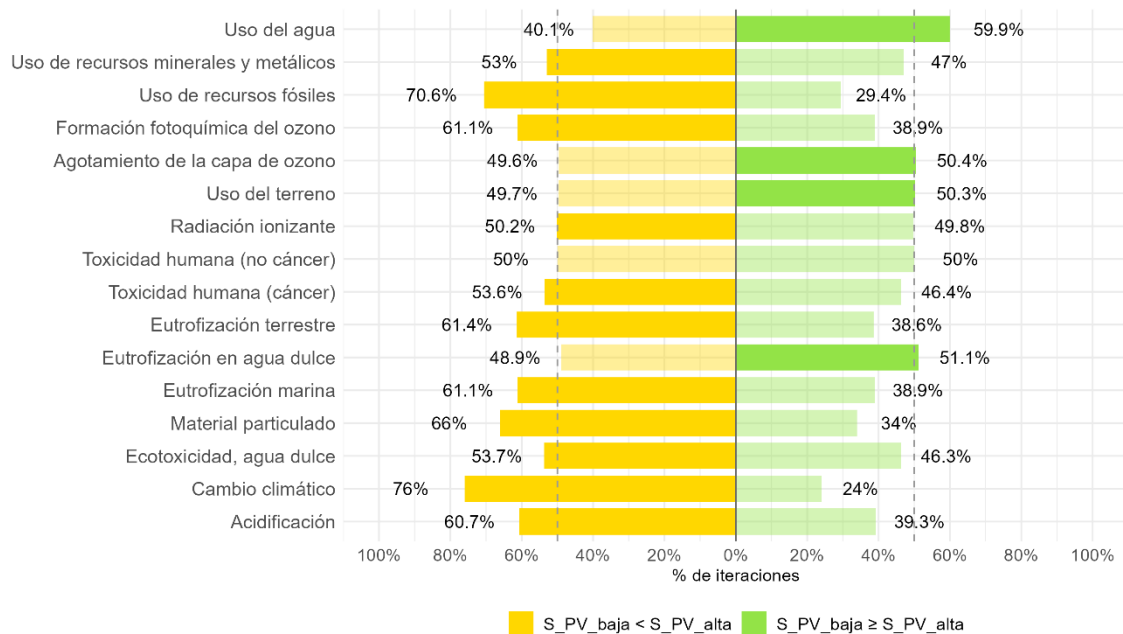


Figura 15. Análisis de incertidumbre para la comparación entre el S_PV_baja y el S_PV_alta.

En un primer grupo de categorías (Cambio climático, Uso de recursos fósiles, Material particulado, Eutrofización marina, Eutrofización terrestre, Acidificación y Formación fotoquímica del ozono) las barras amarillas superan claramente el 50 %, alcanzando valores en torno al 60–70 % de las iteraciones (y hasta el 76 % en cambio climático). Esto indica que, una vez propagada la incertidumbre de inventarios y parámetros, el Escenario 1 presenta impactos menores que el Escenario 2 en la mayoría de las simulaciones, por lo que puede considerarse ambientalmente preferible en estas categorías de forma robusta. La mayor demanda de materiales (especialmente acero galvanizado) y energía asociada a la estructura elevada se traduce, por tanto, en penalizaciones sistemáticas en los indicadores ligados al uso de recursos y a las emisiones atmosféricas.

Un segundo grupo de categorías (Uso de recursos minerales y metálicos, Agotamiento de la capa de ozono, Uso del terreno, Radiación ionizante, Toxicidad humana (cáncer y no cáncer), Eutrofización en agua dulce y Ecotoxicidad) muestra porcentajes muy próximos al 50 % en ambas barras. En estos casos, aproximadamente la mitad de las simulaciones favorece a cada escenario, lo que indica que las diferencias entre estructura baja y elevada son pequeñas respecto a la incertidumbre global del modelo. Desde

el punto de vista estadístico, no puede afirmarse que ninguna de las dos configuraciones sea claramente mejor en estas categorías; las posibles ventajas observadas en los resultados deterministas deben interpretarse como diferencias marginales, dentro del rango de variabilidad de los datos.

Por último, en la categoría Uso del agua la situación se invierte: solo en torno al 40 % de las iteraciones el Escenario 1 presenta un impacto menor, mientras que en casi el 60 % de las simulaciones el Escenario 2 muestra un uso de agua igual o inferior. Esto sugiere que, una vez igualado el paquete funcional (electricidad + producto agrícola), la configuración de estructura elevada tiende a reducir de forma consistente el indicador de uso del agua en comparación con la estructura baja, debido a la producción de los diferentes materiales de construcción de la estructura fotovoltaica.

En conjunto, el análisis de Monte Carlo confirma que, para la mayoría de las categorías de impacto, el parque fotovoltaico de estructura baja (Escenario 1) presenta un desempeño ambiental mejor o equivalente al de la estructura elevada (Escenario 2) con un grado de confianza elevado, mientras que el Escenario 2 solo muestra una ventaja clara en la categoría de uso del agua. Estos resultados complementan el análisis determinista y refuerzan la interpretación de que las diferencias entre ambas configuraciones están dominadas por el compromiso entre consumo de materiales y consumo de agua a escala de sistema extendido.

Comparación Escenario 1 (S_PV_baja) vs Escenario 3 (S_AV_baja)

La Figura 15 muestra los resultados del análisis de incertidumbre para la comparación entre el Escenario 1 (parque fotovoltaico de estructura baja sin cultivo) y el Escenario 3 (sistema agrivoltaico de estructura baja con cultivo entre filas). Al igual que en el caso anterior, para cada categoría de impacto la simulación Monte Carlo conjunta calcula, en cada iteración, los impactos de ambos escenarios bajo la misma realización aleatoria de los inventarios y parámetros. Las barras amarillas representan el porcentaje de iteraciones en las que el Escenario 1 presenta un impacto inferior al Escenario 3 ($\text{Escenario 1} < \text{Escenario 3}$), mientras que las barras naranjas indican la fracción de iteraciones en las que el Escenario 1 es igual o peor ($\text{Escenario 1} \geq \text{Escenario 3}$). La línea vertical situada en el 50 % marca de nuevo el umbral a partir del cual puede considerarse que existe una preferencia estadísticamente consistente por uno de los escenarios.

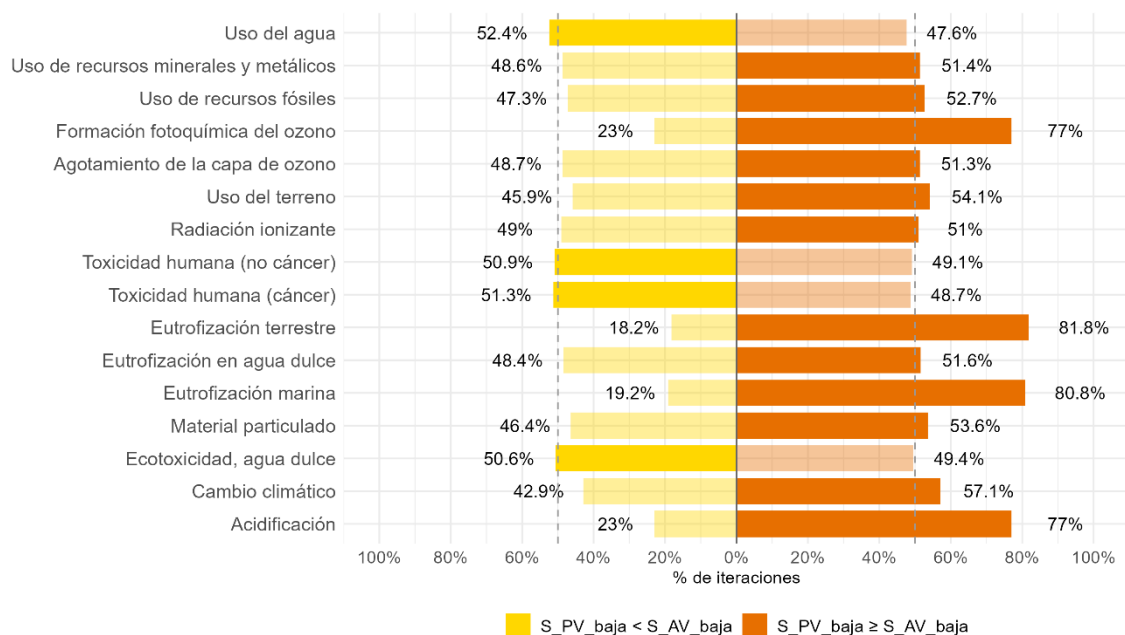


Figura 16. Análisis de incertidumbre para la comparación entre el S_PV_baja y el S_AV_baja.

En varias categorías de impacto las barras naranjas superan claramente el 70 % de las iteraciones, lo que indica una ventaja robusta del Escenario 3 sobre el Escenario 1. Es el caso de Acidificación, Eutrofización marina, Eutrofización terrestre y Formación fotoquímica del ozono, donde el Escenario 1 es igual o peor que el Escenario 3 en torno al 77–82 % de las simulaciones. Esto significa que, incluso teniendo en cuenta la incertidumbre de inventarios y parámetros, el sistema agrivoltaico de estructura baja reduce de forma consistente las cargas asociadas a emisiones de nitrógeno y compuestos precursores de ozono fotoquímico respecto a la ocupación fotovoltaica convencional del suelo agrícola.

En un segundo grupo de categorías (Cambio climático, Material particulado y Uso del terreno) las barras naranjas se sitúan entre aproximadamente el 53 y el 57 % de las iteraciones. Estos valores indican una ligera preferencia estadística por el Escenario 3, pero de menor intensidad que en las categorías anteriores. En la categoría cambio climático, por ejemplo, el Escenario 1 presenta un impacto inferior al Escenario 3 en torno al 43 % de las simulaciones, mientras que en el 57 % restante el Escenario 3 ofrece resultados iguales o mejores. La superioridad del sistema agrivoltaico en estas categorías existe, pero se mueve en un rango de diferencias más estrecho, compatible con las incertidumbres de los datos; las ventajas deben interpretarse como moderadas, no como reducciones drásticas.

En otras categorías (Ecotoxicidad en agua dulce, Toxicidad humana (cáncer y no cáncer), Eutrofización en agua dulce, Agotamiento de la capa de ozono, Radiación ionizante, Uso de recursos minerales y metálicos y Uso de recursos fósiles) los porcentajes de iteraciones a favor de cada escenario se mantienen

muy próximos al 50 %. En estos casos, aproximadamente la mitad de las simulaciones favorece a cada alternativa, lo que indica que las diferencias entre el parque fotovoltaico y el agrivoltaico de estructura baja son pequeñas en relación con la incertidumbre global del modelo. Desde el punto de vista estadístico, no puede concluirse que ninguna de las dos configuraciones sea claramente preferible en estas categorías; cualquier ventaja observada en los resultados deterministas debe considerarse marginal y dentro del rango de variabilidad de los datos.

Por el contrario, en la categoría Uso del agua la barra amarilla alcanza algo más del 52 %, de modo que en una ligera mayoría de iteraciones el Escenario 1 presenta un consumo de agua inferior al Escenario 3. Esto es coherente con los resultados deterministas, que mostraban un incremento del uso de agua en el sistema agrivoltaico de estructura baja debido a la mayor superficie de cultivo irrigada necesaria para proporcionar el mismo paquete funcional de producto agrícola. No obstante, el porcentaje se sitúa muy cerca del 50 %, lo que indica que, aunque la tendencia apunta a un mayor uso de agua en el Escenario 3, la magnitud exacta de esta diferencia está afectada por una incertidumbre considerable (ya comentada en el análisis de CV de la categoría “Uso del agua”).

En conjunto, la simulación Monte Carlo sugiere que el sistema agrivoltaico de estructura baja (Escenario 3) ofrece una mejora ambiental robusta frente al parque fotovoltaico convencional (Escenario 1) en varias categorías clave asociadas a la contaminación atmosférica y a los ciclos de nitrógeno (acidificación, eutrofización terrestre y marina, formación fotoquímica del ozono), y una mejora moderada en cambio climático y uso de recursos. En cambio, el Escenario 3 tiende a incrementar el uso de agua y no muestra diferencias concluyentes en las categorías de toxicidad, ecotoxicidad, uso del terreno o radiación ionizante. Estos resultados ponen de manifiesto que la integración de cultivo entre filas puede reducir ciertas presiones ambientales relevantes.

Comparación Escenario 1 (S_PV_baja) vs Escenario 4 (S_AV_alta)

La Figura 16 presenta los resultados del análisis de incertidumbre para la comparación entre el Escenario 1 (parque fotovoltaico de estructura baja sin cultivo) y el Escenario 4 (sistema agrivoltaico de estructura elevada con cultivo en toda la superficie). Para cada categoría de impacto, la simulación Monte Carlo conjunta calcula en cada iteración los impactos de ambos escenarios bajo la misma realización aleatoria de inventarios y parámetros. Las barras amarillas representan el porcentaje de iteraciones en las que el Escenario 1 presenta un impacto menor que el Escenario 4 (Escenario 1 < Escenario 4), mientras que las barras verdes indican la fracción de iteraciones en las que el Escenario 1 es igual o peor (Escenario 1 ≥ Escenario 4). La línea vertical situada en el 50 % marca el umbral a partir del cual puede

considerarse que existe una preferencia estadísticamente consistente por uno de los escenarios.

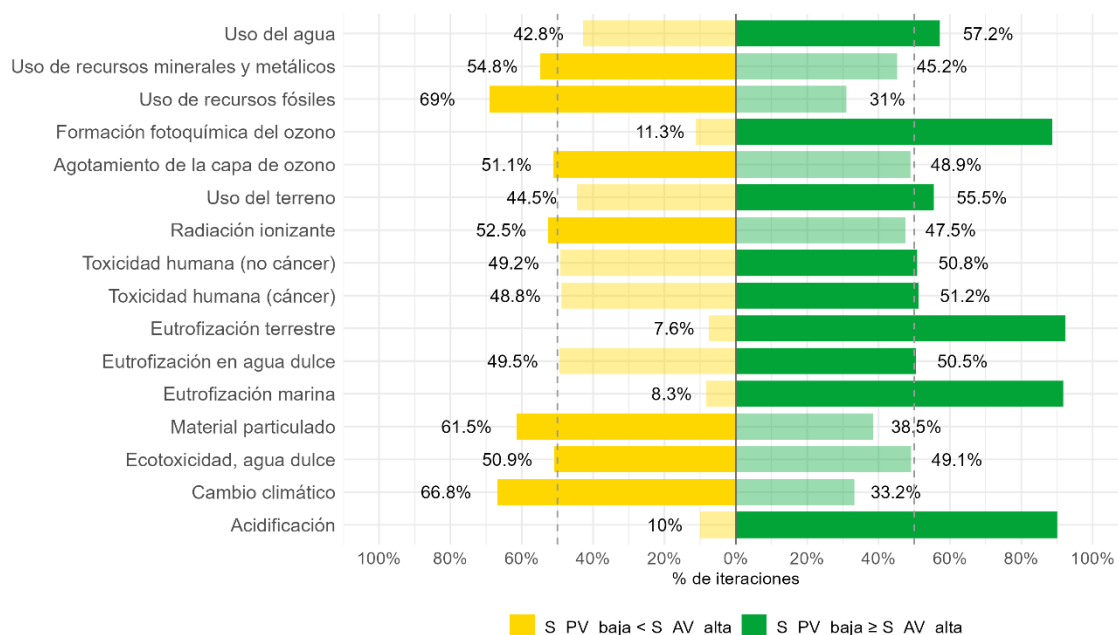


Figura 17. Análisis de incertidumbre para la comparación entre el S_PV_baja y el S_AV_alta.

En un conjunto de categorías asociadas a los ciclos de nitrógeno y a la formación de ozono fotoquímico (Acidificación, Eutrofización marina, Eutrofización terrestre y Formación fotoquímica del ozono) la barra verde supera con claridad el 88–95 % de las iteraciones, mientras que la amarilla queda muy por debajo del 15 %. Esto indica que, en una mayoría abrumadora de simulaciones, el Escenario 4 presenta impactos iguales o inferiores a los del Escenario 1. Es decir, la ventaja del sistema agrivoltaico elevado frente al parque fotovoltaico convencional es robusta en estas categorías, incluso cuando se tiene en cuenta la incertidumbre de los datos. Desde el punto de vista físico, este resultado es coherente con la menor necesidad de superficie de cultivo convencional adicional en el Escenario 4 para alcanzar el mismo paquete de funciones, lo que reduce las aplicaciones de fertilizantes y las emisiones de NH_3 , NO_x y otros compuestos precursores responsables de acidificación, eutrofización y formación de ozono troposférico.

En otras categorías, la superioridad del Escenario 4 es más moderada. En Uso del agua, aproximadamente un 57 % de las iteraciones favorece al Escenario 4 frente a un 43 % que favorece al Escenario 1, reflejando una ligera pero consistente reducción del consumo de agua privativa en el sistema agrivoltaico elevado. Algo similar ocurre en Uso del terreno, donde en torno al 56 % de las simulaciones muestran impactos menores o iguales en el Escenario 4. En Toxicidad humana (cáncer y no cáncer), Ecotoxicidad en agua dulce, Agotamiento de la capa de ozono y Radiación ionizante, las barras

verde y amarilla se mantienen muy próximas al 50 %, de modo que la comparación entre escenarios es esencialmente no concluyente: las diferencias deterministas son pequeñas en relación con la dispersión introducida por la incertidumbre de inventarios y parámetros, y no puede afirmarse que ninguna configuración sea claramente preferible en estas categorías.

Por el contrario, en las categorías ligadas al uso de materiales y energía fósil (Cambio climático, Material particulado y Uso de recursos fósiles), la barra amarilla supera claramente el 60 %, indicando que en la mayoría de las iteraciones el Escenario 1 presenta impactos inferiores a los del Escenario 4. En la categoría de Cambio climático, por ejemplo, el Escenario 1 resulta mejor en aproximadamente un 67 % de las simulaciones; en Material particulado, en torno al 62 %, y en Uso de recursos fósiles, cerca del 69 %. Estos resultados apuntan a que la penalización asociada a la estructura elevada agrivoltaica (mayor cantidad de acero galvanizado y, en general, de materiales por unidad de superficie) se traduce en un aumento sistemático, aunque moderado, de las cargas relacionadas con energía incorporada, combustibles fósiles y emisiones atmosféricas durante la fase de fabricación e instalación. En Uso de recursos minerales y metálicos la ventaja del Escenario 1 es más tenue (≈55 % de iteraciones), lo que sugiere diferencias más pequeñas y cercanas al límite de la incertidumbre.

En conjunto, la simulación Monte Carlo indica que, para un mismo paquete combinado de electricidad y producto agrícola, el sistema agrivoltaico de estructura elevada (Escenario 4) ofrece mejoras robustas en categorías controladas por emisiones de nitrógeno y precursores fotoquímicos (acidificación, eutrofización y formación de ozono) y una ligera ventaja en uso del agua y del terreno, a costa de incrementar de forma consistente los impactos en cambio climático, uso de recursos fósiles y material particulado respecto al parque fotovoltaico de estructura baja sin cultivo (Escenario 1). La magnitud de estas diferencias se mantiene en general dentro de un rango de pocos puntos porcentuales, pero la alta proporción de iteraciones a favor de uno u otro escenario muestra que las diferencias entre ambas configuraciones son estructurales y no fruto del ruido estadístico.

Comparación Escenario 3 (S_AV_baja) vs Escenario 4 (S_AV_alta)

Para completar el análisis, se consideró relevante comparar directamente los dos diseños agrivoltaicos (Escenario 3, AV_baja con cultivo entre filas, y Escenario 4, AV_alta con cultivo en toda la superficie). Mientras que las comparaciones anteriores frente al Escenario 1 permiten evaluar si la agrivoltaica es una alternativa ambientalmente competitiva respecto al uso fotovoltaico convencional del suelo, la comparación 3-4 responde a una pregunta distinta: una vez que se ha optado por la agrivoltaica, qué configuración interna del sistema ofrece un comportamiento ambiental más favorable. Esta comparación adicional permite orientar decisiones de diseño

(altura de la estructura, porcentaje de superficie cultivada, etc.) dentro del propio marco agrivoltaico.

La Figura 17 muestra los resultados del análisis de Monte Carlo para la comparación entre el Escenario 3 y el Escenario 4. Para cada categoría de impacto se representa el porcentaje de iteraciones en las que el impacto del Escenario 3 es menor que el del Escenario 4 (barra naranja, “Escenario 3 < Escenario 4”) y el porcentaje en el que es igual o mayor (barra verde, “Escenario 3 ≥ Escenario 4”). Valores claramente superiores al 50 % en la barra naranja indican que el Escenario 3 es ambientalmente preferible en esa categoría con alta probabilidad; porcentajes claramente superiores al 50 % en la barra verde señalan que, con alta probabilidad, el Escenario 4 presenta un impacto menor.

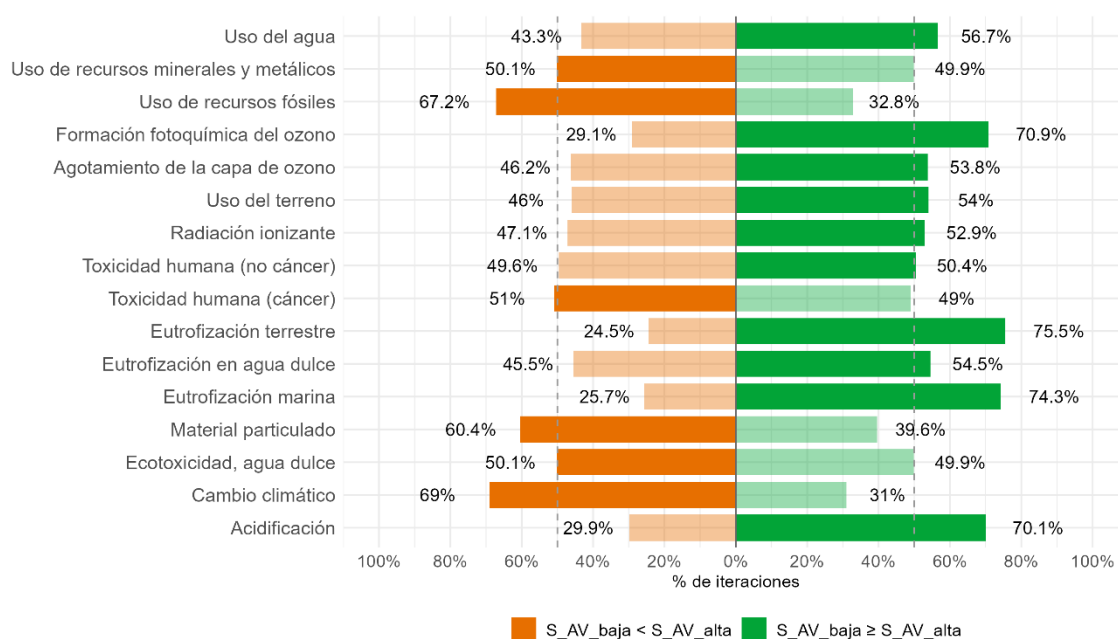


Figura 18. Análisis de incertidumbre para la comparación entre el S_AV_baja y el S_AV_alta.

Los resultados ponen de manifiesto unas diferencias claras entre impactos ligados a materiales/energía y los asociados a contaminación difusa y uso de recursos naturales. El Escenario 3 presenta una probabilidad elevada de ser mejor que el Escenario 4 en Cambio climático (69 % de las iteraciones), Material particulado (≈60 %) y Uso de recursos fósiles (≈67 %). En estas categorías, la estructura más baja y ligera de AV_baja se traduce en menores consumos de acero y energía incorporada, de modo que el sistema con cultivo entre filas tiende a generar menos emisiones de gases de efecto invernadero, menos material particulado y un menor uso de combustibles fósiles por unidad funcional. También en Toxicidad humana (cáncer) la ventaja de Escenario 3 es ligera pero apreciable (≈51 % de las iteraciones), mientras que en Ecotoxicidad en agua dulce y Uso de recursos minerales y

metálicos las probabilidades se sitúan prácticamente en 50/50, lo que indica ausencia de diferencias robustas entre ambas configuraciones.

En cambio, el Escenario 4 muestra ventajas consistentes en la mayoría de categorías ligadas a eutrofización, acidificación, fotoquímica del ozono y uso de agua y suelo. En Acidificación, Eutrofización marina y Eutrofización terrestre, el Escenario 4 presenta impactos menores en aproximadamente 70-75 % de las iteraciones, lo que indica una superioridad robusta del diseño elevado con cultivo en toda la superficie para estos indicadores. También en Eutrofización en agua dulce, Agotamiento de la capa de ozono, Formación fotoquímica del ozono, Uso del terreno, Radiación ionizante y Uso del agua, el Escenario 4 resulta preferible en torno al 54-71 % de las simulaciones. Estas diferencias reflejan que AV_alta requiere menos superficie adicional de cultivo convencional y, por tanto, menos aportes de fertilizantes y menos riego para alcanzar el mismo rendimiento agrícola, reduciendo de forma sistemática las cargas asociadas a emisiones de nutrientes, precursores de ozono fotoquímico y consumo de agua.

En Toxicidad humana (no cáncer) y en Uso de recursos minerales y metálicos las probabilidades se sitúan muy próximas al 50 %, de modo que la comparación entre Escenario 3 y 4 en estas categorías no es concluyente: las diferencias observadas en los resultados deterministas quedan en gran medida enmascaradas por la incertidumbre de los inventarios y de los factores de caracterización. En Ecotoxicidad en agua dulce ocurre algo similar, con una ligera ventaja de Escenario 4 ($\approx 50,1$ % vs $49,9$ %) que no puede considerarse robusta.

En conjunto, el análisis de Monte Carlo entre los dos diseños agrivoltaicos indica que S_AV_baja (Escenario 3) tiende a ser ambientalmente más favorable en categorías dominadas por el uso de materiales y energía (cambio climático, uso de recursos fósiles y material particulado), mientras que S_AV_alta (Escenario 4) resulta preferible en la mayoría de las categorías relacionadas con la contaminación difusa de suelos y aguas, la formación de ozono troposférico, el agotamiento de la capa de ozono y, de forma destacada, el uso del agua. Ninguno de los dos diseños es globalmente superior en todas las categorías; la elección entre ellos dependerá de qué tipos de impacto se consideren prioritarios desde el punto de vista de la gestión ambiental (por ejemplo, minimizar emisiones de GEI y uso de combustibles fósiles frente a reducir eutrofización y consumo de agua en contextos de escasez hídrica).

6.4. Conclusiones

Integrando los resultados deterministas, la descomposición por procesos y el análisis de incertidumbre (simulaciones de Monte Carlo), pueden extraerse las siguientes conclusiones principales:

- Los cuatro superescenarios contruidos mediante expansión del sistema presentan impactos del mismo orden de magnitud en prácticamente todas las categorías de EF 3.1. Las diferencias relativas entre alternativas se sitúan, en la mayoría de las categorías, en un rango reducido ($\approx 0-5\%$), con la excepción del Uso del agua, donde las variaciones alcanzan valores cercanos al 20 %. Esto indica que, una vez igualadas las funciones energética y agrícola, ninguna configuración supone un salto cualitativo drástico respecto a las demás, sino más bien ajustes finos y diferencias específicas.
- La mayor parte de la carga ambiental está asociada a un conjunto reducido de procesos: (i) en la parte fotovoltaica, la infraestructura metálica y los módulos c-Si concentran la mayor contribución a cambio climático, material particulado, formación fotoquímica del ozono y uso de recursos fósiles y minerales; (ii) en la parte agrícola, los principales *hotspots* son los fertilizantes nitrogenados y fosfatados, el diésel agrícola, el riego/consumo de electricidad y, en menor medida, los pesticidas y el transporte de insumos y producto. Estos resultados son coherentes con la bibliografía y delimitan con claridad dónde se concentran las oportunidades de mejora tecnológica.
- Tomando como referencia el uso actualmente más habitual del suelo agrícola (parque fotovoltaico de estructura baja sin cultivo, Escenario 1), los análisis de impacto y de porcentaje de cambio muestran que: El Escenario 2 (S_PV_alta) presenta aumentos sistemáticos, aunque moderados, en la mayoría de categorías ligadas a materiales y energía (cambio climático, uso de recursos fósiles, material particulado), compensados en parte por una reducción clara del uso del agua; El Escenario 3 (S_AV_baja) se comporta de forma muy próxima al Escenario 1 en casi todas las categorías, con variaciones generalmente $<1-2\%$. Desde el punto de vista ambiental, una vez igualadas las funciones, la introducción de cultivo entre filas sobre estructura baja no supone una penalización significativa respecto al parque PV convencional; y El Escenario 4 (S_AV_alta) tiende a presentar los mayores incrementos relativos en categorías asociadas a materiales y energía (cambio climático, uso de recursos fósiles, material particulado), pero a la vez muestra un comportamiento más favorable en Uso del agua y en varios indicadores de eutrofización y

- acidificación, gracias a una menor necesidad de cultivo convencional adicional.
- El análisis de Monte Carlo indica que, para la mayor parte de las categorías (cambio climático, acidificación, eutrofización en agua dulce, uso del terreno, radiación ionizante, uso de recursos fósiles y de minerales y metales), los coeficientes de variación se sitúan mayoritariamente entre ~10 y 25 %, lo que corresponde a una incertidumbre moderada pero aceptable. En estas categorías, las diferencias observadas entre escenarios se consideran estadísticamente robustas y las conclusiones cualitativas (qué escenario es peor o mejor y en qué orden de magnitud) son sólidas. Por el contrario, las categorías de Ecotoxicidad en agua dulce, Toxicidad humana (cáncer y no cáncer), Eutrofización terrestre y Uso del agua presentan CV muy elevados, debidos a la combinación de factores de caracterización muy inciertos, flujos de emisión pequeños con altas desviaciones estándar y, en el caso del agua, contribuciones positivas y negativas con factores de privación muy distintos. En estas categorías los resultados son útiles como orden de magnitud, pero las diferencias finas entre escenarios deben interpretarse con precaución y no como un ranking definitivo.
 - La comparación Monte Carlo entre los Escenarios 3 y 4 confirma que: el Escenario 3 (S_AV_baja) tiene mayor probabilidad de presentar menores impactos en cambio climático, uso de recursos fósiles y material particulado, asociados principalmente a la menor cantidad de acero por hectárea, sin embargo, el Escenario 4 (S_AV_alta) es preferible en la mayoría de categorías relacionadas con eutrofización, acidificación, formación fotoquímica del ozono y uso del agua y del terreno, debido a la menor superficie de cultivo convencional necesaria para alcanzar el mismo rendimiento agrícola. Ninguno de los dos diseños es dominante en todas las categorías; la elección entre ellos dependerá de si se prioriza la reducción de impactos energéticos/estructurales o la minimización de impactos asociados a nutrientes y consumo de agua.
 - Considerando conjuntamente los resultados deterministas y el análisis de incertidumbre, puede afirmarse que: La infraestructura fotovoltaica domina los impactos en prácticamente todos los escenarios; por tanto, las estrategias de reducción deberían priorizar la optimización de la estructura (menos acero/aluminio, diseños más ligeros) y la selección de módulos con menor huella de fabricación; En el subsistema agrícola, la reducción de aportes de nitrógeno, la mejora de la eficiencia del riego y la disminución del uso de diésel y transporte aparecen como las palancas más eficaces para reducir eutrofización, toxicidad y uso del agua; y Desde una perspectiva de política agraria y

energética, la agrivoltaica se perfila como una opción capaz de compatibilizar la generación eléctrica con la producción agrícola sin un aumento sustancial de impactos globales, aunque con diferencias claras entre categorías que deben ser explícitamente considerados en la toma de decisiones.

7. Análisis técnico

7.1. Criterios técnicos de diseño en sistemas agrivoltaicos

El diseño de sistemas agrivoltaicos se fundamenta en la integración funcional entre la generación de energía fotovoltaica y el mantenimiento de la actividad agrícola, de modo que ambos usos del suelo puedan coexistir. La literatura especializada identifica una serie de criterios técnicos de diseño que condicionan de forma directa la viabilidad del sistema y su grado de compatibilidad con las prácticas agrarias existentes (Dupraz, 2011; López Luque y Ramírez Faz, 2023). Entre ellos destacan la altura de las estructuras, el patrón de sombreado y la transmisión de radiación hacia el cultivo, y la compatibilidad con la mecanización agrícola.

7.1.1. Altura de las estructuras

La altura libre bajo los módulos fotovoltaicos constituye uno de los parámetros más determinantes en el diseño de sistemas agrivoltaicos, ya que condiciona tanto la posibilidad de realizar labores agrícolas bajo los paneles como las exigencias estructurales de la instalación. Diversos estudios coinciden en que existe una altura mínima a partir de la cual se garantiza el paso de maquinaria agrícola convencional, situándose este umbral en torno a 2,0–2,5 m para cultivos hortícolas y labores mecanizadas básicas (López Luque y Ramírez Faz, 2023).

En sistemas orientados a una integración agraria más completa, especialmente en explotaciones con mecanización intensiva o cultivos extensivos, se requieren alturas mayores, habitualmente en el rango de 4–6 m, que permiten mantener la totalidad de la superficie cultivable bajo los módulos fotovoltaicos (Rimondi, 2024). Estas configuraciones implican, no obstante, un incremento en la complejidad estructural y en los costes de implantación, mientras que las estructuras de baja altura restringen el uso agrícola del espacio bajo los paneles y desplazan la actividad agraria a las zonas intermedias entre filas (López Luque y Ramírez Faz, 2023).

La selección de la altura de la estructura constituye, por tanto, un compromiso técnico entre compatibilidad agrícola, complejidad constructiva y viabilidad económica del sistema agrivoltaico.

7.1.2. Sombreado y transmisión de radiación

El sombreado inducido por los módulos fotovoltaicos representa el principal mecanismo de interacción entre el sistema energético y el agrícola. La reducción de la radiación incidente sobre el cultivo depende de la geometría de la instalación, incluyendo la altura de los módulos, su inclinación, la separación entre filas y la trayectoria solar a lo largo del año (Dupraz, 2011; López Luque y Ramírez Faz, 2023).

Numerosos estudios experimentales han demostrado que un sombreado parcial moderado no implica necesariamente una reducción proporcional del rendimiento agrícola y que, en determinados contextos, puede resultar compatible con el mantenimiento de la productividad (Kittas, 2012; Aroca-Delgado, 2018). En climas mediterráneos, este efecto puede incluso traducirse en beneficios agronómicos asociados a la reducción del estrés térmico y de la evapotranspiración durante los meses de mayor irradiancia (Cossu, 2017; López-Díaz, 2020).

Sin embargo, las fuentes también señalan que niveles elevados y persistentes de sombreado tienden a comprometer tanto el rendimiento como la calidad de los cultivos, por lo que el diseño agrivoltaico debe evitar la generación de zonas extensas con déficit radiativo permanente (Aroca-Delgado, 2018; López Luque y Ramírez Faz, 2023). En este sentido, el análisis previo de la distribución espacial y temporal de la radiación sobre el terreno constituye un elemento clave del diseño técnico del sistema.

7.1.3. Compatibilidad con mecanización agrícola

La continuidad de la actividad agrícola en sistemas agrivoltaicos no depende únicamente de la altura de las estructuras, sino también de la disposición del campo fotovoltaico. La separación entre filas, la anchura de las calles y la distancia entre apoyos estructurales condicionan la posibilidad de realizar operaciones de siembra, laboreo, riego, tratamientos y cosecha mediante maquinaria agrícola estándar (López Luque y Ramírez Faz, 2023).

Los diseños que permiten calles continuas y gálíbos suficientes facilitan la mecanización completa del cultivo y reducen los costes operativos asociados a la adaptación de las prácticas agrarias, mientras que configuraciones con estructuras bajas o apoyos muy frecuentes limitan el acceso de maquinaria, incrementan la dependencia de trabajos manuales y reducen la superficie efectivamente aprovechable para la producción agrícola (Rimondi, 2024).

Desde el punto de vista técnico, la compatibilidad con la mecanización constituye, por tanto, un criterio clave para diferenciar entre sistemas agrivoltaicos de integración parcial y aquellos orientados a una coexistencia plena entre producción energética y agrícola.

7.2. Evaluación técnica de los escenarios estudiados

7.2.1. Sistemas fotovoltaicos convencionales (PV_baja y PV_alta)

Desde un punto de vista estrictamente eléctrico, ambos escenarios fotovoltaicos convencionales presentan una viabilidad técnica elevada y comparable, al compartir potencia instalada, orientación e inclinación de los módulos. Las diferencias entre ambos se derivan, por tanto, no del comportamiento energético del sistema, sino de su relación funcional con el uso del suelo y de los requerimientos estructurales asociados a la altura de instalación.

El escenario PV_baja, con los módulos situados a 0,5 m sobre el terreno, representa una configuración típica de plantas fotovoltaicas sobre suelo. Esta solución destaca por su simplicidad constructiva y por el uso eficiente de materiales estructurales, pero implica una ocupación prácticamente exclusiva del terreno durante la fase de operación, imposibilitando cualquier uso agrícola compatible más allá de aplicaciones muy específicas y de bajo requerimiento operativo. Desde el punto de vista técnico-funcional, el suelo queda dedicado de forma casi exclusiva a la producción energética.

El escenario PV_alta, con módulos elevados hasta 3,6 m, es técnicamente viable desde el punto de vista estructural y normativo. Sin embargo, en ausencia de una integración explícita de la actividad agrícola bajo los paneles, esta configuración no aporta ventajas funcionales relevantes frente al escenario PV_baja. La elevación de la estructura conlleva un aumento en el uso de materiales y en la complejidad constructiva, sin generar beneficios adicionales en términos de uso del suelo si no se acompaña de un aprovechamiento agrícola efectivo. Este escenario resulta, por tanto, especialmente útil como referencia comparativa para aislar el efecto de la altura estructural en análisis posteriores.

7.2.2. Sistema agrivoltaico de estructura baja (AV_baja)

El escenario AV_baja introduce una coexistencia parcial entre la generación fotovoltaica y la actividad agrícola mediante el cultivo en los espacios intermedios entre filas de paneles. Desde el punto de vista técnico, esta configuración presenta una mayor eficiencia material que los sistemas elevados y una complejidad constructiva relativamente contenida.

No obstante, la baja altura de los módulos impone limitaciones significativas a la mecanización agrícola, restringiendo el uso de maquinaria convencional bajo los paneles y concentrando las labores agrícolas en zonas específicas del terreno. Además, la proximidad de los módulos al suelo tiende a generar patrones de sombreado más rígidos y menos dinámicos, con una mayor

interferencia física durante las operaciones de siembra, mantenimiento y cosecha.

Como resultado, este escenario se sitúa en una posición intermedia entre una planta fotovoltaica convencional y un sistema agrivoltaico plenamente integrado. Su aplicabilidad técnica queda condicionada a cultivos compatibles con una mecanización limitada o a explotaciones con un bajo grado de intensidad operativa, asumiendo un compromiso elevado en el uso agrícola del suelo.

7.2.3. Sistema agrivoltaico de estructura elevada (AV_alta)

El escenario AV_alta se ajusta de forma más clara a los criterios técnicos definidos en la literatura para sistemas agrivoltaicos abiertos y elevados. La altura de la estructura permite la circulación de maquinaria agrícola convencional, reduce la interferencia directa entre los módulos fotovoltaicos y el cultivo, y facilita la continuidad de las labores agrícolas en la mayor parte de la superficie del terreno.

Los resultados del análisis de sombreado muestran que, durante los meses de mayor altura solar, la sombra se concentra principalmente bajo la proyección directa de los módulos, mientras que las zonas intermedias presentan una elevada disponibilidad de radiación. Este comportamiento estacional es coherente con los principios de diseño agrivoltaico orientados a maximizar la complementariedad entre la producción eléctrica y la agrícola, permitiendo adaptar el uso del suelo a las condiciones radiativas a lo largo del año (Dupraz, 2011; López Luque y Ramírez Faz, 2023).

Desde un punto de vista técnico-funcional, este escenario ofrece el mayor grado de integración entre ambos subsistemas, a costa de un incremento en los requerimientos estructurales y en la complejidad constructiva, aspectos que se analizan de forma específica en los apartados posteriores.

7.3. Integración técnico-funcional energía-agricultura

La integración entre la producción energética y la actividad agrícola en sistemas agrivoltaicos no se limita a la coexistencia física de paneles fotovoltaicos y cultivos sobre una misma superficie, sino que depende de la capacidad del sistema para mantener de forma simultánea la funcionalidad de ambos subsistemas. Desde un punto de vista técnico-funcional, esta integración se manifiesta en la gestión del microclima, en el aprovechamiento efectivo del suelo y en la flexibilidad operativa del conjunto.

7.3.1. Microclima

La presencia de módulos fotovoltaicos modifica las condiciones microclimáticas a escala local, principalmente a través del sombreado parcial del cultivo y de la alteración del balance energético superficial. En climas mediterráneos, este efecto puede traducirse en una reducción de la temperatura del aire y del suelo bajo los paneles, así como en una disminución de la evapotranspiración, contribuyendo potencialmente a mitigar el estrés térmico durante los periodos de mayor irradiancia (Dupraz, 2011; López Luque y Ramírez Faz, 2023).

En los escenarios analizados, los patrones de sombreado obtenidos muestran una marcada variabilidad estacional, con una concentración de la sombra bajo los módulos durante los meses de verano y una mayor extensión en primavera y otoño. Esta dinámica resulta especialmente relevante en los sistemas agrivoltaicos elevados, donde el sombreado tiende a distribuirse de forma más gradual, facilitando una gestión pasiva del microclima compatible con el desarrollo del cultivo. Por el contrario, en configuraciones de baja altura, la proximidad de los módulos al suelo intensifica la interferencia microclimática y reduce la capacidad de adaptación del sistema.

7.3.2. Uso del suelo

Uno de los objetivos fundamentales de los sistemas agrivoltaicos es optimizar el uso del suelo mediante la producción simultánea de energía y alimentos. Desde un punto de vista técnico-funcional, esta optimización no se mide únicamente en términos de ocupación espacial, sino en la capacidad de mantener una actividad agrícola continua y operativa en la mayor parte de la superficie disponible.

Los resultados obtenidos muestran que los sistemas agrivoltaicos elevados permiten un uso agrícola más homogéneo del terreno, al posibilitar el cultivo tanto bajo los módulos como en los espacios intermedios entre filas. En cambio, los sistemas de estructura baja concentran la actividad agrícola en zonas específicas, limitando la superficie efectivamente cultivable y condicionando la selección de cultivos y prácticas agrarias.

En este sentido, el escenario AV_alta presenta una integración más equilibrada entre producción energética y uso agrícola del suelo, mientras que el escenario AV_baja representa una solución de compromiso, con una coexistencia espacial parcial pero con restricciones funcionales relevantes.

7.3.3. Flexibilidad operativa

La flexibilidad operativa constituye un aspecto clave en la integración técnico-funcional de sistemas agrivoltaicos, ya que determina la capacidad del sistema para adaptarse a las necesidades cambiantes tanto del cultivo como de la instalación fotovoltaica. Esta flexibilidad depende de factores como la altura libre bajo los módulos, la disposición de las estructuras, la accesibilidad para maquinaria y la compatibilidad entre las operaciones agrícolas y las tareas de mantenimiento eléctrico.

Los sistemas agrivoltaicos elevados ofrecen un mayor grado de flexibilidad, al permitir la circulación de maquinaria agrícola convencional y facilitar la coordinación entre labores agrarias y operaciones de mantenimiento de la instalación fotovoltaica. Por el contrario, los sistemas de estructura baja presentan mayores restricciones operativas, incrementando la probabilidad de interferencias entre ambos usos y reduciendo la capacidad de adaptación del sistema a distintas estrategias de manejo agrícola.

En conjunto, la comparación entre escenarios pone de manifiesto que una integración técnico-funcional efectiva se alcanza cuando el diseño permite mantener la funcionalidad agrícola sin penalizar de forma significativa la producción energética, condición que se cumple de forma más robusta en los sistemas agrivoltaicos de estructura elevada.

7.4. Síntesis

El análisis técnico realizado permite extraer conclusiones claras sobre el grado de viabilidad y de integración funcional de los distintos escenarios evaluados. Las diferencias observadas no se derivan del comportamiento eléctrico de los sistemas, que resulta comparable entre configuraciones, sino de su capacidad para compatibilizar la generación de energía con el mantenimiento de la actividad agrícola.

Los sistemas fotovoltaicos convencionales maximizan la producción eléctrica sobre el terreno, pero implican una ocupación prácticamente exclusiva del suelo durante la fase de operación, excluyendo cualquier uso agrícola compatible. La elevación de la estructura en ausencia de cultivo no introduce mejoras técnicas sustanciales desde el punto de vista funcional, más allá de servir como referencia comparativa para analizar el efecto de la altura estructural.

El sistema agrivoltaico de estructura baja introduce una coexistencia parcial entre ambos usos, pero presenta limitaciones técnicas relevantes asociadas a la baja altura de los módulos, la restricción de la mecanización agrícola y una menor flexibilidad operativa. Estas características condicionan su

aplicabilidad a contextos específicos y a explotaciones con un bajo grado de intensidad productiva.

Por el contrario, el sistema agrivoltaico de estructura elevada ofrece el mayor grado de integración técnico-funcional entre producción energética y actividad agrícola. La posibilidad de mantener la mecanización convencional, junto con una distribución más favorable y dinámica del sombreado, permite preservar la funcionalidad agraria sin penalizar de forma significativa la producción eléctrica. En este sentido, el escenario AV_alta se identifica como la solución técnicamente más robusta cuando el objetivo es compatibilizar la generación renovable con la continuidad de la actividad agrícola existente.

En conjunto, la comparación técnica pone de manifiesto que la elección del diseño agrivoltaico implica un compromiso entre complejidad estructural y nivel de integración funcional, siendo los sistemas elevados los que mejor responden a los criterios técnicos establecidos para una coexistencia efectiva entre energía y agricultura.

8. Análisis económico

8.1. Objetivo y alcance del análisis

El objetivo del presente análisis económico es evaluar la viabilidad económica relativa de los distintos escenarios técnicos considerados en este estudio, que incluyen sistemas fotovoltaicos convencionales y sistemas agrivoltaicos, tanto de estructura baja como de estructura elevada, en el contexto específico de las Islas Baleares. Este análisis se plantea desde un enfoque comparativo, coherente con el marco metodológico adoptado en el análisis técnico y en el análisis ambiental de ciclo de vida, siguiendo las recomendaciones habituales en estudios integrados de evaluación de sistemas agrivoltaicos (López Luque y Ramírez Faz, 2023; Rimondi, 2023).

Todos los escenarios analizados comparten una base técnica común, definida por una misma superficie de referencia (1 ha) y una producción eléctrica anual comparable por unidad de superficie, tal y como se describe en la definición de escenarios (Apartado 2 del presente informe). Las diferencias entre alternativas se concentran principalmente en el diseño estructural de la instalación fotovoltaica, el grado de compatibilidad con la actividad agrícola y la intensidad de uso del suelo, aspectos ampliamente identificados en la literatura como determinantes del comportamiento económico de los sistemas agrivoltaicos (López Luque y Ramírez Faz, 2023; Rimondi, 2023).

Desde el punto de vista metodológico, el análisis económico se basa en una caracterización diferenciada de los costes, distinguiendo entre costes de inversión inicial (CAPEX) y costes de operación y mantenimiento (OPEX), de acuerdo con los criterios empleados habitualmente en la evaluación económica de instalaciones fotovoltaicas y agrivoltaicas. Esta distinción resulta especialmente relevante en la comparación entre sistemas fotovoltaicos convencionales y sistemas agrivoltaicos, dado que estos últimos incorporan condicionantes adicionales derivados de la necesidad de compatibilizar la generación eléctrica con la continuidad de las labores agrícolas, tal como se recoge en estudios previos y documentos técnicos de referencia (López Luque y Ramírez Faz, 2023; Rimondi, 2023).

Asimismo, el análisis adopta el principio de doble producción como marco conceptual para la evaluación económica de los sistemas agrivoltaicos. A diferencia de las instalaciones fotovoltaicas convencionales, diseñadas exclusivamente para la generación de electricidad, los sistemas agrivoltaicos permiten la coexistencia funcional entre la producción energética y la actividad agrícola en una misma superficie. Este enfoque, ampliamente respaldado por la literatura especializada, recomienda evaluar estos sistemas considerando de forma integrada ambos outputs productivos, con el fin de reflejar adecuadamente la eficiencia económica del uso del suelo.

El alcance del análisis económico se limita a la fase de operación de los sistemas, considerando una vida útil representativa coherente con la asumida en el análisis ambiental de ciclo de vida.

8.2. Costes de inversión (CAPEX)

Los costes de inversión (CAPEX) representan el conjunto de desembolsos necesarios para la implantación de los sistemas analizados con anterioridad al inicio de su fase de operación. En proyectos fotovoltaicos sobre suelo, esta inversión constituye el componente económico más relevante de la inversión inicial, al estar directamente relacionado con la rentabilidad potencial del sistema, el periodo de recuperación de la inversión y su comportamiento económico a lo largo de la vida útil (Guillén Verde, 2025; Rimondi, 2023).

En el presente estudio, el CAPEX se define como el conjunto de costes asociados a la adquisición de los equipos principales, la ejecución de las obras necesarias y la puesta en marcha de cada una de las alternativas consideradas (PV_baja, PV_alta, AV_baja y AV_alta).

El objetivo de este apartado es estimar un coste sólido, comparable y trazable para cada escenario, expresado tanto en €/kWp como en €/ha, permitiendo evaluar cómo las decisiones de diseño estructural y de integración agronómica influyen en el esfuerzo inversor inicial y, en última instancia, en la eficiencia económica del uso del suelo.

8.2.1. Unidades de referencia y conversión a €/ha

El CAPEX se expresa en €/kWp instalado y, con el fin de mantener la coherencia con el ACV y facilitar la comparación del uso del suelo, también en €/ha. La conversión se realiza mediante la relación:

$$\text{CAPEX}_{\text{€/ha}} = \text{CAPEX}_{\text{€/kWp}} \times \text{Densidad}_{\text{kWp/ha}}$$

Se adoptan como referencias de densidad aproximadamente 0,5 MWp/ha para instalaciones fotovoltaicas convencionales sobre suelo y hasta 0,83 MWp/ha para determinadas soluciones agrivoltaicas suspendidas, en función de la geometría, la separación entre filas y la altura de la estructura (Guillén Verde, 2025; Rimondi, 2023). Este enfoque permite comparar de forma directa el esfuerzo inversor asociado a cada alternativa en términos de valor económico por unidad de superficie.

8.2.2. Rangos de referencia

Las fuentes especializadas proporcionan rangos indicativos de inversión por tipología que permiten contextualizar los valores obtenidos en el estudio. Una referencia ampliamente citada, recogida por López Luque y Ramírez Faz (2024) a partir de Scharf et al. (2021), sitúa el CAPEX en torno a 572 €/kWp para FV en suelo, 688 €/kWp para sistemas agrivoltaicos verticales, 859 €/kWp para agrivoltaica elevada fija y hasta 1.234 €/kWp en configuraciones elevadas con seguidores.

Estos diferenciales son coherentes con casos reales documentados, como un proyecto agrivoltaico elevado de aproximadamente 2 MWp en el norte de Italia, con un presupuesto total del orden de 2–3 M€ ($\approx 1,0\text{--}1,5$ €/Wp), donde el sobrecoste se concentra principalmente en la estructura elevada y el cableado asociado (Rimondi, 2023). En el contexto español, Guillén Verde (2025) sitúa el CAPEX de instalaciones fotovoltaicas sobre suelo en un rango de 0,77–0,87 €/W, valores que se utilizan en este estudio como referencia para los escenarios PV_baja y como base para los ajustes necesarios en configuraciones más complejas.

La evidencia disponible indica que el incremento de CAPEX al pasar de FV convencional a soluciones agrivoltaicas se explica mayoritariamente por la estructura, las cimentaciones y la obra civil asociada a los requisitos de altura y rigidez, y no por los módulos o los inversores (López Luque y Ramírez Faz, 2024).

8.2.3. Desglose por partidas y principales referencias de coste

En instalaciones fotovoltaicas convencionales sobre suelo, el reparto típico del CAPEX se sitúa en torno a los siguientes porcentajes:

Tabla 12. Distribución CAPEX en instalaciones fotovoltaicas. Fuente: Guillén Verde (2025).

Módulos fotovoltaicos	40-50 (%)
Inversores	8-12 (%)
Estructuras (fijas o móviles)	10-20 (%)
Obra civil y montaje	8-10 (%)
Instalación eléctrica	5-10 (%)
Ingeniería, licencias y permisos	5-8 (%)
Costes indirectos y seguridad	2-5 (%)

En sistemas agrivoltaicos, especialmente en configuraciones elevadas, aumenta de forma significativa el peso relativo de la estructura y de la obra civil, así como de la ingeniería, debido a los condicionantes agronómicos y a la necesidad de compatibilizar la instalación con el uso agrícola del suelo (López Luque y Ramírez Faz, 2024). Los principales factores de

encarecimiento del CAPEX en agrivoltaica incluyen la altura libre requerida para el paso de maquinaria, la separación entre vanos, la elección del sistema de cimentación, la integración de accesos agrícolas y, en su caso, la incorporación de seguidores o tecnologías de módulo específicas.

8.2.4. Estructura, cimentaciones y condicionantes regulatorios

Diversos autores y casos reales coinciden en señalar que la exigencia de altura libre es el principal factor diferencial del CAPEX en agrivoltaica elevada (López Luque y Ramírez Faz, 2024; Rimondi, 2023). Para las cimentaciones, se recomiendan soluciones hincadas o mediante pilotes tornillo por su menor afección al suelo, su reversibilidad y, en determinados contextos geotécnicos, su menor coste frente a zapatas de hormigón.

Adicionalmente, la normativa española vigente condiciona el diseño y el CAPEX de los proyectos agrivoltaicos. La Orden TED/765/2024 establece requisitos técnicos, entre ellos la incorporación de almacenamiento mínimo de 0,5 kWh/kWp para la elegibilidad a determinadas ayudas, lo que introduce partidas adicionales de inversión que deben considerarse explícitamente en la estimación del CAPEX (López Luque y Ramírez Faz, 2024).

8.2.5. Riesgos y contingencias

La estimación del CAPEX está sujeta a incertidumbres asociadas, entre otros factores, a la volatilidad de los precios del acero, a posibles sorpresas geotécnicas, a la especificación del sistema de almacenamiento y a los plazos administrativos. En fase de previsión, se recomienda considerar contingencias del orden del 5–10 % para instalaciones fotovoltaicas convencionales y del 10–15 % para sistemas agrivoltaicos elevados, ajustables posteriormente tras la recepción de ofertas cerradas y la realización de estudios geotécnicos detallados (López Luque y Ramírez Faz, 2024; Guillén Verde, 2025).

8.3. Costes de operación y mantenimiento (OPEX)

Los costes de operación y mantenimiento (OPEX), comprenden el conjunto de gastos recurrentes necesarios para garantizar el funcionamiento adecuado de los sistemas analizados a lo largo de su vida útil. A diferencia del CAPEX, concentrado en la fase inicial del proyecto, el OPEX se distribuye anualmente durante la fase de operación e incluye actividades como el mantenimiento preventivo y correctivo de la instalación, la limpieza de módulos, la supervisión técnica del sistema y la gestión operativa asociada.

En proyectos fotovoltaicos sobre suelo, el OPEX representa una fracción reducida del coste total del sistema, pero su carácter recurrente influye de forma relevante en el comportamiento económico a largo plazo y, por tanto, debe estimarse de manera coherente con el enfoque comparativo del estudio.

Para la estimación del OPEX se emplean valores de referencia procedentes de fuentes institucionales y estudios sectoriales recopilados en el marco metodológico del estudio (Guillén Verde, 2025), que sitúan el coste anual de operación y mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas en suelo en un rango aproximado de 0,008–0,014 €/W·año (valor central orientativo \approx 0,011 €/W·año).

8.3.1. Alcance y partidas consideradas

En coherencia con la práctica habitual en operación y mantenimiento de plantas fotovoltaicas, se consideran como componentes principales del OPEX (Guillén Verde, 2025):

- **Mantenimiento preventivo y correctivo:** revisiones eléctricas periódicas, inspecciones, sustitución de componentes menores y acciones correctivas ante incidencias.
- **Limpieza de módulos:** necesaria para controlar pérdidas por ensuciamiento (*soiling*), especialmente relevantes en entornos agrícolas; la frecuencia puede situarse típicamente entre 1 y 3 limpiezas/año en función del régimen de lluvias y del entorno.
- **Monitorización y supervisión** (SCADA/plataformas de control) y gestión del rendimiento.
- **Costes administrativos y seguros**, así como tasas asociadas a la explotación.

8.3.2. Sistemas fotovoltaicos convencionales

En los escenarios fotovoltaicos convencionales, el OPEX se asocia fundamentalmente a tareas estándar de operación y mantenimiento: mantenimiento preventivo de equipos eléctricos, limpieza periódica, supervisión del rendimiento y gestión técnica. Dado el carácter monofuncional de estas instalaciones y la ausencia de interferencias con otros usos del suelo, los costes de operación presentan una estructura relativamente estable y predecible, por lo que los rangos de referencia adoptados resultan representativos para este tipo de configuración (Guillén Verde, 2025).

8.3.3. Sistemas agrivoltaicos

En los sistemas agrivoltaicos, la coexistencia de generación fotovoltaica y actividad agrícola introduce una mayor complejidad operativa, principalmente por (1) mayores exigencias de accesibilidad y mantenimiento en estructuras elevadas, (2) necesidad de coordinación con las labores agrícolas y (3) potenciales requisitos adicionales de seguimiento/monitorización en determinadas configuraciones.

Ahora bien, la evidencia comparativa disponible indica que, aunque el OPEX puede experimentar incrementos en algunas tipologías agrivoltaicas, su contribución al diferencial económico frente a FV convencional permanece relativamente acotada, siendo el CAPEX el factor dominante en las diferencias observadas en el coste de generación (López Luque y Ramírez Faz, 2024; Fraunhofer Institute, 2022).

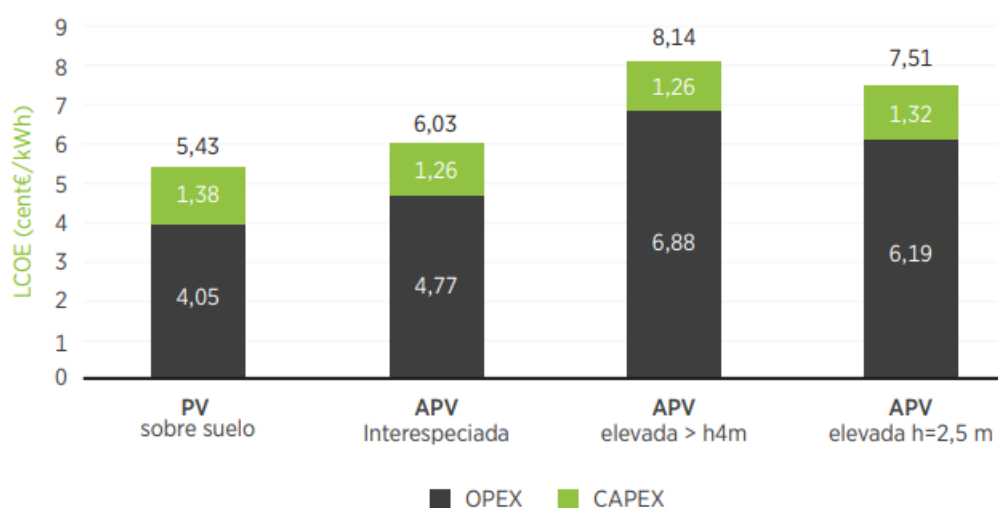


Figura 19. Comparación CAPEX y OPEX en función del LCOE para sistemas agrivoltaicos.
Gráfico: López Luque y Ramírez Faz, 2023. Datos: Fraunhofer Institute, 2022.

En consecuencia, y en coherencia con el enfoque comparativo del estudio, el OPEX de los escenarios agrivoltaicos se analiza utilizando como base los mismos valores de referencia que en FV convencional, reconociendo que las variaciones operativas esperables no alteran sustancialmente el orden de magnitud del coste anual en comparación con el impacto observado en la inversión inicial.

8.3.4. Consideraciones operativas y fuentes de incertidumbre

Dado que el OPEX depende en parte de condiciones locales de operación (ensuciamiento, accesos, logística de mantenimiento), se considera especialmente relevante prestar atención a (Guillén Verde, 2025):

- **Necesidades de limpieza** en entornos agrícolas y sus efectos sobre rendimiento y coste.
- **Accesibilidad y seguridad** en configuraciones elevadas, que pueden modificar el esfuerzo operativo en tareas de inspección y mantenimiento.
- **Coordinación con labores agrícolas**, para evitar interferencias y reprogramaciones operativas.

8.4. Ingresos y rendimiento económico

La estimación de ingresos y la evaluación del rendimiento económico relativo de los escenarios considerados se fundamentan en la identificación de los outputs productivos asociados a cada configuración técnica y en el análisis de cómo estos contribuyen al desempeño económico global del sistema. En coherencia con el enfoque comparativo del estudio, los resultados no se interpretan como una maximización aislada de beneficios, sino como una medida de eficiencia económica del uso del suelo, especialmente relevante en un contexto insular con elevada presión sobre este recurso, como las Islas Baleares.

En este marco, los ingresos se derivan de dos fuentes principales: (1) la producción de energía eléctrica (común a todos los escenarios) y (2) la producción agrícola, presente únicamente en los escenarios agrivoltaicos. La evaluación conjunta de ambos outputs permite comparar de forma coherente alternativas con distinta funcionalidad del terreno, evitando sesgos derivados de analizar únicamente métricas energéticas cuando existe coproducción (energía + alimentos).

8.4.1. Producción de energía eléctrica y su valoración económica

Dado que todos los escenarios comparten una misma superficie de referencia y una potencia instalada equivalente por unidad de superficie, las diferencias en la producción eléctrica se asocian principalmente a variaciones derivadas del diseño estructural y de la configuración del sistema fotovoltaico.

Desde el punto de vista económico, la producción eléctrica constituye el principal output monetizable en todos los escenarios. En los sistemas fotovoltaicos convencionales, este output representa la única fuente directa de ingresos asociada a la instalación. En los sistemas agrivoltaicos, la producción eléctrica mantiene un papel central en el balance económico, aunque puede verse acompañada por ligeras variaciones según la configuración adoptada.

En lo relativo a su valoración, el ingreso eléctrico depende del precio de la electricidad y, por tanto, está expuesto a volatilidad de mercado. Esta volatilidad se reconoce mediante el análisis de series históricas del mercado mayorista español y su variación interanual, aspecto que se retoma en el apartado de riesgos e incertidumbre (Guillén Verde, 2025).

8.4.2. Producción agrícola en los escenarios agrivoltaicos

En los escenarios agrivoltaicos, la actividad agrícola se mantiene de forma simultánea a la generación de energía eléctrica, dando lugar a un segundo output productivo relevante desde el punto de vista económico. A diferencia de los sistemas fotovoltaicos convencionales, en los que el uso agrícola del suelo queda excluido durante la fase de operación, los sistemas agrivoltaicos permiten conservar, total o parcialmente, la producción agrícola en la superficie ocupada por la instalación.

La magnitud de este output agrícola depende del diseño estructural del sistema, del grado de cobertura de los módulos y de la superficie efectivamente disponible para el cultivo. En configuraciones de estructura baja, la producción agrícola se concentra principalmente en los espacios intermodulares, mientras que en sistemas de estructura elevada se dispone de una mayor continuidad del uso agrícola bajo los módulos.

Para estimar la productividad agrícola relativa en condiciones de sombra, el estudio utiliza rendimientos mensuales por cultivo calculados mediante el simulador ATERRA, que integra la geometría de la instalación y la radiación disponible para derivar el rendimiento relativo medio mensual de cada cultivo bajo distintas condiciones de sombreado.

Desde una perspectiva económica, esta producción agrícola no se interpreta únicamente como un “ingreso adicional”, sino como un mecanismo que contribuye a preservar el valor productivo del suelo al evitar (total o parcialmente) la pérdida de productividad agraria que se produciría en un escenario fotovoltaico convencional.

8.4.3. Implicaciones económicas de la doble producción y métricas de rentabilidad

En el marco del análisis desarrollado, esta producción dual se interpreta como un mecanismo de compensación parcial del mayor CAPEX asociado a configuraciones agrivoltaicas, particularmente en tipologías elevadas. De forma complementaria, la literatura emplea indicadores de productividad conjunta del terreno como el Land Equivalent Ratio (LER), que cuantifica la productividad relativa cuando coexisten producción agrícola y eléctrica, frente a realizarlas por separado; un $LER > 1$ indica sinergia técnica, aunque

no implica automáticamente sinergia económica, que requiere incorporar costes e ingresos (López Luque y Ramírez Faz, 2023).

Para evaluar la rentabilidad económica del proyecto se emplean indicadores financieros estándar, como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), ampliamente utilizados en la evaluación de inversiones energéticas. El VAN permite cuantificar la rentabilidad del proyecto en términos monetarios actualizando flujos de caja, mientras que la TIR corresponde a la tasa de descuento que anula el VAN, facilitando la comparación entre alternativas (López Luque y Ramírez Faz, 2023).

Asimismo, y con el fin de complementar los indicadores financieros con una lectura energética, se recurre a la métrica de coste nivelado de la electricidad (LCOE), que relaciona costes de inversión (CAPEX), operación (OPEX) y valor residual con la energía generada durante la vida útil. Esta métrica es útil para comparar eficiencia de generación, si bien en escenarios agrivoltaicos debe interpretarse con cautela al no capturar por sí sola el valor económico de la coproducción agrícola (López Luque y Ramírez Faz, 2023).

En conjunto, el rendimiento económico relativo entre escenarios se interpreta, por tanto, desde una visión integrada que combina: (1) ingresos eléctricos, (2) preservación y/o generación de valor agrícola en los escenarios agrivoltaicos y (3) métricas financieras y energéticas consistentes con el enfoque comparativo del estudio.

8.5. Riesgos e incertidumbres

La evaluación económica de los escenarios analizados debe incorporar explícitamente la existencia de incertidumbres y riesgos que afectan a la rentabilidad (VAN, TIR y periodo de recuperación), tanto comunes a la fotovoltaica convencional como específicos de la integración agrivoltaica. En particular, en sistemas con componente agrario los rendimientos y márgenes están condicionados por variabilidad climática, disponibilidad hídrica, restricciones físicas del terreno y dependencia de políticas agrarias, lo que introduce dispersión estructural en los resultados económicos (Guillén Verde, 2025).

De forma complementaria, la generación fotovoltaica está expuesta a incertidumbres asociadas a la evolución de los precios de la electricidad, cambios regulatorios y condiciones del mercado energético. En este contexto, los escenarios monofuncionales (PV) presentan una mayor dependencia de un único mercado, mientras que los sistemas agrivoltaicos (AV), al combinar ingresos agrícolas y energéticos, introducen una diversificación parcial del riesgo que puede mejorar la resiliencia económica frente a escenarios adversos (Guillén Verde, 2025).

8.5.1. Principales fuentes de riesgo por categoría

8.5.1.1. Riesgos de mercado (electricidad y agricultura)

- **Precio de la electricidad:** los ingresos eléctricos dependen del régimen de venta (mercado/pool, PPA o autoconsumo con excedentes). Una caída sostenida de precios afecta directamente al flujo de caja y puede penalizar especialmente alternativas con mayor CAPEX (p. ej., estructuras elevadas) (Guillén Verde, 2025).
- **Precios agrícolas:** la volatilidad por cultivo y campaña introduce incertidumbre en el margen agrario y, por tanto, en la contribución económica de los escenarios AV (Guillén Verde, 2025).

8.5.1.2. Riesgos técnicos, constructivos y de suministro

- **Desviaciones de CAPEX:** aumentos de precio o disponibilidad de materiales (especialmente acero) y complejidad estructural pueden elevar la inversión real respecto a la estimación. Este tipo de riesgo es especialmente relevante en configuraciones elevadas por mayores exigencias mecánicas.
- **Plazos y logística:** retrasos en suministros, obra y montaje pueden desplazar la entrada en operación y, con ello, los flujos de ingresos. El enfoque de gestión de riesgos por probabilidad-impacto y la planificación de respuestas (evitar/reducir/transferir/aceptar) se recoge en planes de dirección de proyectos agrivoltaicos como el de Rimondi (2023).

8.5.1.3. Riesgos operativos (OPEX y desempeño FV)

- **Ensuciamiento y pérdidas de rendimiento:** en entornos agrícolas puede aumentar el ensuciamiento (*soiling*), elevando necesidades de limpieza y afectando el PR y los kWh monetizables.
- **Indisponibilidad y vida útil efectiva:** variaciones en la vida útil y reposiciones de equipos influyen en los costes y en la energía entregada.

8.5.1.4. Riesgos agronómicos e hídricos (específicos AV)

- **Respuesta del cultivo al sombreado:** una geometría o densidad de módulos inadecuada puede reducir rendimientos agrícolas por debajo de los umbrales esperados. La mitigación se basa en selección de cultivos, diseño geométrico y gestión agronómica adaptativa (López Luque y Ramírez Faz, 2024).

- **Riego y drenaje:** pueden aparecer costes adicionales de adaptación; a la vez, la bibliografía recoge potenciales reducciones de consumo hídrico bajo sombreado parcial en determinados contextos, cuya materialización depende del manejo agronómico (López Luque y Ramírez Faz, 2024).

8.5.1.5. Riesgos regulatorios y de elegibilidad a ayudas (España)

La elegibilidad de ayudas para proyectos agrivoltaicos puede depender del cumplimiento de requisitos técnicos y agronómicos (p. ej., tipologías, potencia mínima, límites de cobertura opaca, pérdida máxima de superficie cultivable, y obligación de disponer de almacenamiento en el marco de la Orden TED/765/2024) (López Luque y Ramírez Faz, 2024). El incumplimiento implica pérdida de subvención y, por tanto, impacto directo en VAN/TIR.

8.5.2. Mitigación y resiliencia del modelo agrivoltaico

Pese a incorporar riesgos específicos (agronomía, coordinación de labores, adaptación operativa), la evidencia recogida en el marco del estudio indica que estos riesgos pueden reducirse significativamente mediante: (1) selección de cultivos adecuados, (2) diseño geométrico que mantenga la continuidad agraria y (3) gestión agronómica adaptativa (López Luque y Ramírez Faz, 2024).

Desde el punto de vista económico, la coexistencia de ingresos agrícolas y energéticos tiende a reducir la varianza de los flujos de caja agregados, ofreciendo un perfil riesgo-retorno más equilibrado que proyectos monofuncionales dependientes de un único mercado (Guillén Verde, 2025).

8.5.3. Gestión de riesgos y seguimiento

En coherencia con buenas prácticas de dirección de proyectos, la gestión del riesgo se estructura como un proceso continuo: identificación, análisis cualitativo (probabilidad-impacto), análisis cuantitativo cuando sea necesario, planificación e implementación de respuestas y monitorización. Este enfoque (incluyendo matrices de probabilidad-impacto y asignación de responsabilidades tipo RACI) se describe en planes de dirección de proyectos agrivoltaicos como el de Rimondi (2023).

Como criterio operativo, el seguimiento puede apoyarse en indicadores de desempeño (p. ej., PR y pérdidas por ensuciamiento en FV; kg/ha y consumo hídrico en agricultura; y verificación de requisitos de continuidad agraria y de elegibilidad a ayudas cuando aplique), integrando la operación energética y agraria en un esquema de control coherente con la naturaleza dual del sistema.

8.5.4. Tratamiento cuantitativo de la incertidumbre

Dada la incertidumbre inherente a variables críticas (precios, rendimientos agrícolas, vida útil y parámetros operativos), se recomienda complementar los resultados deterministas con análisis de sensibilidad y, cuando proceda, con aproximaciones probabilísticas. En el propio trabajo ya se aplica un tratamiento probabilístico en el bloque ambiental mediante simulación Monte Carlo (1000 iteraciones) y uso de distribuciones para parámetros clave (vida útil, rendimiento de cultivo, área efectiva), lo que constituye un precedente metodológico útil para interpretar robustez y dispersión de resultados.

En el plano económico, estudios recientes aplican enfoques estocásticos (sensibilidades y simulación) para capturar la volatilidad del mercado eléctrico y la variabilidad agraria, mejorando la robustez de la toma de decisiones (Guillén Verde, 2025).

8.6. Síntesis del análisis

El análisis económico desarrollado en los apartados anteriores pone de manifiesto que la comparación entre los escenarios considerados (PV_baja, PV_alta, AV_baja y AV_alta) no debe basarse exclusivamente en el nivel de inversión inicial ni en indicadores puramente energéticos, sino en una evaluación integrada del uso del suelo y de los flujos económicos asociados a cada alternativa, en coherencia con el enfoque del estudio.

8.6.1. Diferencias de coste

Tal y como se ha analizado en el apartado de costes de inversión, los escenarios fotovoltaicos convencionales presentan el menor esfuerzo inversor inicial, al responder a diseños monofuncionales optimizados para la generación eléctrica. Por el contrario, los sistemas agrivoltaicos requieren un mayor CAPEX, especialmente en configuraciones elevadas, debido a las exigencias estructurales necesarias para garantizar la compatibilidad con la actividad agrícola.

El análisis de costes de operación y mantenimiento muestra, en cambio, que el OPEX tiene un peso relativamente secundario en la diferenciación económica entre escenarios, y que las diferencias operativas entre configuraciones fotovoltaicas y agrivoltaicas no alteran sustancialmente el orden de magnitud de los costes anuales. En consecuencia, el diferencial económico entre alternativas está dominado principalmente por el CAPEX, y no por los costes recurrentes.

8.6.2. Diferencias de ingresos

Desde el punto de vista de los ingresos, los escenarios fotovoltaicos convencionales dependen exclusivamente de la producción eléctrica, mientras que los sistemas agrivoltaicos incorporan un segundo output productivo asociado al mantenimiento de la actividad agrícola. Tal como se ha expuesto en el apartado de ingresos y rentabilidad, esta coproducción no debe interpretarse únicamente como un ingreso adicional, sino como un mecanismo que permite preservar el valor productivo del suelo y mejorar la eficiencia económica global del sistema.

En este sentido, la agrivoltaica introduce una lógica de uso multifuncional del territorio, que resulta especialmente relevante en contextos donde el suelo constituye un recurso limitante. La comparación económica basada únicamente en métricas energéticas no captura adecuadamente este efecto, por lo que el análisis se ha orientado a una lectura integrada de los flujos económicos por unidad de superficie.

8.6.3. Diseño y regulación

El análisis de riesgos e incertidumbres ha mostrado que tanto la actividad agrícola como la generación fotovoltaica están expuestas a fuentes de riesgo específicas, vinculadas a la variabilidad climática, a la evolución de los precios y al marco regulatorio. En este contexto, los sistemas agrivoltaicos presentan una mayor diversificación de fuentes de ingreso, lo que contribuye a una mayor resiliencia económica frente a escenarios adversos, si bien introduce también riesgos adicionales de carácter técnico y agronómico que deben ser gestionados mediante diseño y operación adecuados.

8.6.4. Escenarios

De forma sintética, los resultados permiten establecer que:

- Los escenarios fotovoltaicos convencionales destacan por su menor inversión inicial y su orientación a la maximización de la generación eléctrica, pero implican la exclusión del uso agrícola del suelo durante la fase de operación.
- Los escenarios agrivoltaicos requieren un mayor esfuerzo inversor, especialmente en configuraciones elevadas, pero permiten mantener la actividad agrícola y mejorar la eficiencia económica del uso del suelo.
- Las configuraciones agrivoltaicas elevadas son las que mejor garantizan la continuidad de la actividad agraria, a costa de un mayor

CAPEX, mientras que las configuraciones agrivoltaicas bajas presentan un compromiso intermedio entre inversión y compatibilidad agrícola.

8.6.5. Conclusión general

En conjunto, el análisis económico confirma que la agrivoltaica no debe evaluarse como una variante más costosa de la fotovoltaica convencional, sino como un modelo productivo diferente, orientado a maximizar el valor económico del territorio mediante un uso dual del suelo. La elección entre escenarios depende, por tanto, de los objetivos del proyecto y del contexto territorial, debiendo valorarse conjuntamente los costes, los ingresos, los riesgos y la eficiencia en el uso del recurso suelo, en coherencia con el enfoque global del estudio.

9. Referencias

- Agostini, A., Colauzzi, M., & Amaducci, S. (2021). Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. *Applied Energy*, 281, 116102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116102>
- Ali Abaker Omer, A., Li, M., Zhang, F., Hassaan, M. M. E., El Kolaly, W., Zhang, X., Lan, H., Liu, J., & Liu, W. (2025). Impacts of agrivoltaic systems on microclimate, water use efficiency, and crop yield: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 221, 115930. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115930>
- Amirahmadi, E., Ghorbani, M., Moudrý, J., Konvalina, P., & Kopecký, M. (2023). Impacts of Environmental Factors and Nutrients Management on Tomato Grown under Controlled and Open Field Conditions. *Agronomy*, 13(3), 916. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030916>
- Arias, L. A., Garzón, A., Ayarza, A., Aux, S., & Bojacá, C. R. (2021). Environmental fate of pesticides in open field and greenhouse tomato production regions from Colombia. *Environmental Advances*, 3, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100031>
- Chatzisyneon, E., Foteinis, S., & Borthwick, A. G. L. (2017). Life cycle assessment of the environmental performance of conventional and organic methods of open field pepper cultivation system. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(6), 896-908. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1204-8>
- Conselleria agricultura, pesca i alimentació. Institut de recerca i formació agroalimentaria i pesquera Illes Balears. (2021). *Estadísticas agrárias y pesqueras 2021-2023* [Dataset].
- Demir, C. (2023). Analyses of energy use and greenhouse gas emissions (GHG) in watermelon production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 16(5), 221-225. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20231605.7918>
- Dijkman, T. J., Birkved, M., & Hauschild, M. Z. (2012). PestLCI 2.0: A second generation model for estimating emissions of pesticides from arable land in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 973-986. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0439-2>
- Ecoinvent (Versión 3.12). (s. f.). [Dataset]. Recuperado 1 de diciembre de 2025, de <https://ecoinvent.org/>
- Economou, F., Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., Klontza, E., Lekkas, D. F., Vincenzo, N., Demetriou, G., Navarro-Pedreño, J., & Zorpas, A. A. (2023). Life cycle assessment of potato production in insular communities under subtropical climatic conditions. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100419. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100419>
- Esmailzadeh, S., Asgharipour, M. R., & Khoshnevisan, B. (2020). Water footprint and life cycle assessment of edible onion production—A case study in Iran. *Scientia Horticulturae*, 261, 108925. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108925>
- Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Zhang, J., Fthenakis, V., Kim, H. C., Raugei, M., & Stucki, M. (2015). *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems*.
- Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2011). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85(8), 1609-1628. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002>
- Hospido, A., Milà i Canals, L., McLaren, S., Truninger, M., Edwards-Jones, G., & Clift, R. (2009). The role of seasonality in lettuce consumption: A case study of environmental and social aspects. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 381-391. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0091-7>
- Krexner, T., Bauer, A., Gronauer, A., Mikovits, C., Schmidt, J., & Kral, I. (2024). Environmental life cycle assessment of a stilted and vertical bifacial crop-based agrivoltaic multi land-use system

and comparison with a mono land-use of agricultural land. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 196, 114321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114321>

Martínez-Blanco, J., Muñoz, P., Antón, A., & Rieradevall, J. (2011). Assessment of tomato Mediterranean production in open-field and standard multi-tunnel greenhouse, with compost or mineral fertilizers, from an agricultural and environmental standpoint. *Journal of Cleaner Production*, 19(9-10), 985-997. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.018>

Martin-Gorritz, B., Gallego-Elvira, B., Martínez-Alvarez, V., & Maestre-Valero, J. F. (2020). Life cycle assessment of fruit and vegetable production in the Region of Murcia (south-east Spain) and evaluation of impact mitigation practices. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121656>

Romero-Gámez, M., Audsley, E., & Suárez-Rey, E. M. (2014). Life cycle assessment of cultivating lettuce and escarole in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 73, 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.053>

Suppen-Reynaga, N., Guerrero, A. B., Dominguez, E. R., Sacayón, E., & Solano, A. (2024). Life cycle assessment of bananas, melons, and watermelons from Costa Rica. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 9, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100120>

Whiting, K., Conrad, S., Bradley, T., & Coburn, T. (2024). A Comprehensive Life Cycle Assessment Framework for Agrivoltaic Systems. *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 3. <https://doi.org/10.52825/agripv.v3i.1396>

Rimondi, Ilaria (2024). Desarrollo del plan de dirección de un proyecto agrivoltaico nel Norte de Italia de 2000kWp. Trabajo Fin de Máster. <https://riunet.upv.es/entities/publication/df87a6ba-ec4e-401c-831e-833aa9dc57ce>

Dupraz, C.; Marrou, H.; Talbot, G.; Dufour, L.; Nogier, A.; Ferard, Y. (2011): «Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes»; en *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>

Aroca-Delgado, R.; Pérez-Alonso, J.; Callejón-Ferre, Á. J.; Velázquez-Martí, B. (2018): «Compatibility between crops and solar panels: An overview from shading systems»; en *Sustainability* (Switzerland) (Vol. 10, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/su10030743>

Kittas, C.; Katsoulas, N.; Rigakis, N.; Bartzanas, T.; Kitta, E. (2012): «Effects on microclimate, crop production and quality of a tomato crop grown under shade nets»; en *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 87(1), 7–12. <https://doi.org/10.1080/14620316.2012.11512822>

Cossu, M.; Ledda, L.; Urracci, G.; Sirigu, A.; Cossu, A.; Murgia, L.; Pazzona, A.; & Yano, A. (2017): «An algorithm for the calculation of the light distribution in photovoltaic greenhouses»; en *Solar Energy*, 141, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.024>

López-Díaz, G.; Carreño-Ortega, A.; Fatnassi, H.; Poncet, C.; Díaz-Pérez, M. (2020): «The Effect of Different Levels of Shading in a Photovoltaic Greenhouse with a North–South Orientation»; en *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 882, 10(3), 882. <https://doi.org/10.3390/AP10030882>

Guillén Verde, Juan Antonio, León Blanco, Jose Miguel (2025). Análisis económico mediante opciones reales de una inversión agrivoltaica como solución al abandono del olivar de secano tradicional. Trabajo Fin de Grado. <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/fbe5f313-7ad8-4a60-ab55-64f348ece9f9/content>

López Luque, Rafael, Ramírez Faz, José Cristóbal (2023). Consideraciones para la implantación del modelo agrivoltaico. La estrategia de transición energética. https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Consideraciones+para+la+implantaci%C3%B3n+del+modelo+agrivoltaico&btnG=

Scharf, J.; Grieb, M.; Fritz, M. (2021): Agri-Photovoltaik Stand und offene Fragen.
https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/tfz_bericht_73_agripv.pdf

Fraunhofer Institute (2022): Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition.