BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE PROYECTOS DEMOSTRATIVOS DE AGRIVOLTAICA EN EUROPA Y SU APLICABILIDAD EN EL CONTEXTO DE EUSKADI



Estudiante: Elizondo Gómez, Yun

Director/Directora: Villena Camarero, Unai

Curso: 2025-2026

Fecha: Bilbao, 22 de Junio de 2026

Índice

Resumen 9
1. Introducción 11
2. Contexto 12
2.1. Contexto global 12
2.2. Definición de agrivoltaica 13
2.3. Desarrollo reciente en Europa 14
3. Objetivos y alcance del trabajo 16
3.1. Objetivo general 16
3.2. Objetivos específicos 16
3.3. Alcance y limitaciones 16
4. Beneficios que aporta el trabajo y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 17
5. Estado del arte 18
5.1. Tipologías y clasificación de sistemas agrivoltaicos 18
5.1.1. Según el tipo de aplicación 18
5.1.2. Según la configuración estructural 20
5.1.3. Distinción según la tecnología de movimiento y funcionamiento 25
5.1.4. Distinción según el nivel de integración tecnológica 27
5.1.5. Distinción según la tecnología fotovoltaica o tipos de módulos 28
5.1.6. Tecnologías emergentes 30
5.2. Interacción entre producción agrícola y generación energética 32
5.2.1. Efectos del sombreado y microclima 32
5.2.2. Productividad agrícola y comportamiento fitotécnico 34
5.2.3. Producción energética y eficiencia del sistema 36
5.3. Factores de viabilidad de sistemas agrivoltaicos 37
5.3.1. Factores técnicos y métricas de diseño 38
5.3.2. Factores económicos 40
5.3.3. Factores sociales y aceptación social 44
5.3.4. Factores regulatorios y políticas públicas 47
6. Estudio de caso 50
6.1. Justificación del estudio 50
6.1.1. Brechas de conocimiento 50
6.1.2. Condiciones específicas de Euskadi 51
6.2. Metodología 58
6.2.1. Descripción de la metodología 58
6.2.2. Matriz de análisis propuesta 59

6.3. Proyectos agrivoltaicos en Europa y elección de una muestra para su análisis 61
6.4. Análisis de una muestra de proyectos agrivoltaicos 63
6.4.1. Caracterización de la muestra 63
6.4.2. Caracterización del subsistema fotovoltaico e integración tecnológica 68
6.4.3. Producción agrícola y generación energética reportados 75
6.4.4. Factores económicos 80
6.4.5. Marco regulatorio y factores sociales 82
6.4.6. Transferibilidad a Euskadi 84
6.4.7. Análisis en conjunto 87
7. Diagrama de Gantt 89
8. Descripción del presupuesto del TFG 90
9. Conclusiones 91
Bibliografía 92

Índice de imágenes

Ilustración 1. Crecimiento de la capacidad de electricidad renovable por segmento tecnológico y cuota de energía solar fotovoltaica 2013-2030 [3]. 12
Ilustración 2. Evolución de la potencia solar fotovoltaica instalada en todo el mundo entre 2000 y 2022 [5]. 13
Ilustración 3. Historia del desarrollo agrivoltaico [9] 15
Ilustración 4. Clasificación amplia de los sistemas agrivoltaicos con ejemplos adecuados de los sistemas agrícolas empleados [8] 18
Ilustración 5. Clasificación de los agrivoltaicos [12]. 18
Ilustración 6. Diferentes tipos de ganado pastando bajo paneles solares [12] 19
Ilustración 7. Diagrama esquemático del sistema acuavoltaico [12] 19
Ilustración 8. Imagen de la granja de peces de Star Acuacultura [12] 20
Ilustración 9. Representación tridimensional que destaca cómo diferentes configuraciones pueden apoyar la agricultura y la ganadería [7]. 21
Ilustración 10. Configuraciones de sistemas agrivoltaicos basadas en ENEA [13] 23
Ilustración 11. Sistemas agrivoltaicos principales según el 91434 DIN SPEC. [8] 24
Ilustración 12. Estrategias estándar de seguimiento (ST) y de seguimiento inverso (RT) [14] .. 26
Ilustración 13. Imagen de una central agrícola equipada con un sistema de seguimiento solar de doble eje [15]..... 27
Ilustración 14. Tres módulos principales de c-Si utilizados en sistemas agrivoltaicos [8] 29
Ilustración 15. Esquemática de las categorías de tecnología fotovoltaica y sus respectivas eficiencias [16] 29
Ilustración 16. (A) Ilustración del módulo microconcentrador Insolight, (B) la luz directa se enfoca en las celdas: modo eléctrico o "modo E", y (C) la luz directa se enfoca entre las celdas: Máxima transmisión de luz "modo MLT" [8]..... 30
Ilustración 17. (A), (B) Módulos OPV desarrollados e implementados en un invernadero en Francia [8] 31
Ilustración 18. (C), (D) Módulos LSC Soliculture y su integración en un invernadero [8] 31
Ilustración 19. Módulo fotovoltaico concentrador con un espejo dicroico, permitiendo que el espectro PAR llegue a la planta mientras el NIR se refleja en una célula fotovoltaica [8] 32
Ilustración 20. (A) Visualización de una instalación de módulos tubulares y (B) una vista más cercana de los componentes [8] 32
Ilustración 21. Relación entre energía, alimentación, medio ambiente y sociedad con el sistema agrícola [4]. 38
Ilustración 22. Comparación CAPEX entre aplicaciones fotovoltaicas montadas en tierra y dos aplicaciones diferentes de agrivoltaica aérea [8]..... 42
Ilustración 23. Comparación de CAPEX y OPEX en sistemas GM-PV y Agrivoltaicos [8]..... 43
Ilustración 24. Impactos ambientales, económicos y sociales de la agrivoltaica. [6] 44
Ilustración 25. Tendencias en publicaciones basadas en Scopus para diversos sistemas agrícolas [12] 50
Ilustración 26. Crecimiento de las publicaciones agrícolas [20] 50
Ilustración 27. Distribución de la irradiación global media diaria en España. Enero 2025. [21] 52
Ilustración 28. Cobertura nubosa en Bilbao, Donostia y Gasteiz [22]. 53
Ilustración 29. Precipitaciones mensuales de las tres capitales vascas. [22]..... 53
Ilustración 30. Distribución del potencial de aprovechamiento neto (nueva potencia a instalar). [23] 54
Ilustración 31. Superficie y producción por cultivo 2005-2024 [25]. 56
Ilustración 32. Topografía del País Vasco. [26]..... 56

Ilustración 33. Estrategia de Cambio Climático del País Vasco, KLIMA 2050. [27]..... 57
Ilustración 34. Zonas viables medioambiental y urbanísticamente definidas según los criterios del PTS Energías Renovables, PTP Álava-Araba Central y PGOU Vitoria-Gasteiz [38]. 58
Ilustración 35. Metodología de estudio. Elaboración propia..... 59
Ilustración 36. Mapa de proyectos agrivoltaicos Agrisolar [28]. 63
Ilustración 37. Finca Nidolères. Sistema abierto elevado. 65
Ilustración 38. Explotación biodinámica finca Hofgemeinschaft Heggelbach. 65
Ilustración 39. Proyecto Agrivoltaica San Gabriel con sombreado dinámico sobre viñedo. 66
Ilustración 40. Recinto experimental de Agropolis. 67
Ilustración 41. Solución agrivoltaica “Insolagrin” en Conthey, cantón de Valais, Suiza 68
Ilustración 42. Paneles con inclinación variable gracias a las persianas móviles 70
Ilustración 43. Cultivo en planta elevada con una cosechadora de patatas 71
Ilustración 44. Configuración dinámica de cuatro trackers independientes de un eje horizontal. 72
Ilustración 45. Disposiciones de paneles fotovoltaicos con diferentes niveles de transparencia. a) 40 % de transmitancia y b) 5 % de transmitancia 73
Ilustración 46. Sensórica y monitorización en la planta Agropolis. a) Medición de radiación PAR, b) monitorización del suelo a nivel de cultivo. 73
Ilustración 47. Instalación elevada con módulos THEIA..... 74
Ilustración 48. Recogida de uva en la planta de Nidolères..... 76
Ilustración 49. Uso doble del suelo para agricultura y cultivo de patatas. 77
Ilustración 50. Cultivo bajo paneles en agrivoltaica San Gabriel 78
Ilustración 51. Cultivo de cultivos en Agropolis. a) Diagramas experimentales aleatorios; b) Primer plano de la lechuga; c) Primer plano del cultivo de brócoli. 79
Ilustración 52. Productividad agrícola respecto al cultivo bajo plástico. 79

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución del suelo en la C.A. de Euskadi por tipo de uso según territorio histórico. 2025. Gobierno Vasco [24] 55
Tabla 2. Matriz de análisis. 60
Tabla 3. Caracterización de los proyectos seleccionados..... 64
Tabla 4. Tipologías del sistema de los casos seleccionados..... 69
Tabla 5. Producción agrícola y energética de los proyectos seleccionados. 75
Tabla 6. Impacto económico de los proyectos seleccionados. 80
Tabla 7. Factores sociales y regulatorios de los sistemas seleccionados. 82
Tabla 8. Transferibilidad de los proyectos seleccionados a Euskadi. 85
Tabla 9. Costes de personal..... 90
Tabla 10. Costes de equipamiento (amortización) 90
Tabla 11. Material consumible..... 90
Tabla 12. Presupuesto 90

Siglas y acrónimos

ACV	Análisis de ciclo de vida
ADEME	*Agence de la Transition Écologique* (Agencia Francesa de Transición Ecológica)
AEMet	Agencia Estatal de Meteorología (España)
Agri-PV	Agrivoltaica
APER	*Associazione Produttori Energia da Fonti Rinnovabili* (Italia)
APV-RESOLA	*Agrophotovoltaics for Resource-Efficient Land Use* (Proyecto Alemán de Fraunhofer ISE)
AVS	*Agrivoltaic System* (Sistema agrivoltaico)
BNetzA	*Bundesnetzagentur* (Agencia Federal de Redes)
CAPEX	*Capital Expenditure* (costes de inversión)
CdTe	*Cadmium Telluride* (telururo de cadmio)
CGMPV	*Conventional Ground-Mounted Photovoltaic system in renewable energy* (Sistema fotovoltaico convencional montado en el suelo)
CIGS	*Copper Indium Gallium Diselenide* (diseleniuro de cobre, indio y galio)
CPV	*Concentrated photovoltaics* (fotovoltaica de concentración)
CRE	*Commission de Régulation de l´Energie* (Comisión Reguladora de la Energía, Francia)
c-Si	*Crystalline Silicon* (Silicio cristalino)
EAVS	*European Agricultural Value System*
EEG	*Erneuerbare-Energien-Gesetz* (Ley alemana de energías renovables)
EVE	Ente Vasco de la Energía
FAO	*Food and Agriculture Organization* (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FEADER	Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural
FV	Fotovoltaica
HSAT	*Horizontal Single-Axis Tracking* (Seguimiento solar de un eje horizontal)
IEA	*International Energy Agency* (Agencia Internacional de Energía)
IRENA	*International Renewable Energy Agency* (Agencia Internacional de Energías Renovables)
LAI	*Leaf Area Index* (Índice de Área Foliar)

LCOE	*Levelized Cost of Energy* (coste nivelado de energía)
LER	*Land Equivalent Ratio* (Relación de equivalencia de tierra)
LSC	*Luminescent Solar Concentrator* (Colector Solar Luminiscente)
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
MWp	*Megawatt peak* (Megavatio pico)
NIR	*Near Infrared Radiation* (Infrarrojo cercano)
NREL	*National Renewable Energy Laboratory* (EE. UU.)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OPEX	*Operational Expenditure* (costes operativos)
OPV	*Organic Photovoltaics* (Fotovoltaica orgánica)
PAR	*Photosynthetically Active Radiation* (Radiación Fotosintéticamente Activa)
PERC	*Passivated Emitter and Rear Cell*
PERT	*Passivated Emitter Rear Totally Diffused*
PNACC	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático
PNIECC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
PPFD	*Photosynthetic Photon Flux Density* (Densidad de Flujo de Fotones Fotosintéticos)
RT	*Reverse Tracking* (seguimiento inverso)
SR	*Shading Ratio (*relación de sombreado)
ST	*Standard Tracking (*seguimiento estándar)
TIR	Tasa Interna de Retorno
VAN	Valor Actual Neto
VF	Valor Final
1T	*One Tracker* (Sistema de seguimiento de un eje)

Empleo de Inteligencia Artificial (IA)

La inteligencia artificial se ha utilizado exclusivamente como herramienta de apoyo para la revisión de la redacción, contribuyendo a mejorar la cohesión textual, la claridad expositiva y la integración de ideas, así como para evitar repeticiones en el texto.

El contenido del trabajo se ha desarrollado a partir de fuentes bibliográficas y documentales contrastadas, debidamente citadas en la bibliografía.

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo analizar diversos proyectos demostrativos de agrivoltaica desarrollados en Europa, con el fin de identificar aquellos modelos que podrían aplicarse al contexto agroclimático y socioeconómico de Euskadi.

En el marco de la transición energética, donde la energía solar está adquiriendo un papel cada vez más relevante, se plantea la necesidad de encontrar soluciones que permitan compatibilizar la generación de energía renovable con la preservación del suelo agrícola y la seguridad alimentaria. En este sentido, la agrivoltaica, entendida como la combinación de la actividad agrícola y la generación de energía fotovoltaica en una misma superficie, se presenta como una alternativa prometedora ante el creciente conflicto por el uso del suelo. El estudio se basa en un análisis comparativo de varios casos reales europeos, mediante una matriz que tiene en cuenta aspectos tecnológicos, productivos y de gestión, previamente definidos en el estado del arte. A partir de este análisis, se identifican los factores técnicos, económicos y regulatorios que favorecen o limitan la implantación de la agrivoltaica en Euskadi.

Finalmente, se valora la transferibilidad de los modelos al territorio vasco, atendiendo a sus características agrarias, topográficas y normativas. Los resultados obtenidos indican que la agrivoltaica puede representar una oportunidad para avanzar hacia un modelo energético más sostenible, reforzando al mismo tiempo la resiliencia del sector agrario y contribuyendo a la transición energética. No obstante, su desarrollo requerirá una adecuada adaptación al contexto local, así como avances en el marco regulatorio, estrategias que favorezcan la aceptación social y el diseño de incentivos específicos que faciliten su implementación.

Palabras clave: agrivoltaica, energía fotovoltaica, uso del suelo, transición energética, Euskadi, análisis comparativo.

Abstract

This Final Degree Project aims to analyze several demonstrative agrivoltaic projects developed in Europe in order to identify models with potential application to the agroclimatic and socio-economic context of the Basque Country.

Within the framework of the energy transition, where solar energy is playing an increasingly relevant role, there is a growing need for solutions that allow the compatibility of renewable energy generation with the preservation of agricultural land and food security. In this context, agrivoltaics is understood as the simultaneous combination of agricultural activity and photovoltaic energy generation on the same land, emerging as a promising alternative to address the increasing conflict over land use. The study is based on a comparative analysis of several European real-world cases, evaluated through a common assessment matrix that considers technological and management aspects previously defined in the state of the art. From this analysis, the technical, economic and regulatory factors that favour or limit the implementation of agrivoltaics in the Basque Country are identified.

Finally, the transferability of these models to the Basque territory is evaluated, considering its agricultural, topographical, and regulatory characteristics. The results indicate that agrivoltaics may represent a significant opportunity to move towards a more sustainable model, strengthening the resilience of the agricultural sector while contributing to the energy transition. However, its development will require proper adaptation to the local context, as well as progress in regulatory frameworks, strategies to foster social acceptance and the design of specific incentives to facilitate its implementation.

Keywords: agrivoltaics, photovoltaic energy, land use, energy transition, viability, Basque Country, comparative analysis.

Laburpena

Gradu Amaierako Lan honen helburua Europan teknologia agriboltaikoa frogatzeko garatu diren hainbat proiektu aztertzea da, Euskadiko testuinguru agroklimatikoan eta sozioekonomikoan aplika daitezkeen ereduak identifikatzeko.

Trantsizio energetikoaren esparruan, non eguzki-energia gero eta garrantzi handiagoa hartzen ari den, energia berriztagarriaren sorkuntza nekazaritza-lurzoruen kontserbazioarekin eta elikagaien segurtasunarekin bateragarri egiteko irtenbideak aurkitzeko beharra planteatzen da. Alde horretatik, agriboltaika, hau da, nekazaritza-jardueraren eta azalera berean elektrizitatea sortzearen arteko konbinazioa, etorkizun handiko alternatiba da lurzoruaren erabilerak eragin ditzakeen gatazken aurrean. Ikerketa Europako hainbat kasu errealen analisi konparatibo batean oinarritzen da, artearen egoeran aldez aurretik definitutako alderdi teknologikoak, produktiboak eta kudeaketakoak kontuan hartzen dituen matrize baten bidez. Azterketa horretatik abiatuta, Euskadin agriboltaikoa ezartzea errazten edo mugatzen duten faktore teknikoak, ekonomikoak eta arautzaileak identifikatzen dira.

Azkenik, aztertutako kasuak Euskal Autonomia Erkidegora transferitzeko aukera balioesten da, haien nekazaritza-, topografia- eta araudi-ezaugarriak kontuan hartuta. Lortutako emaitzek adierazten dute agriboltaika aukera bat izan daitekeela eredu energetiko iraunkorrago baterantz aurrera egiteko, aldi berean nekazaritza-sektorearen erresilientzia indartuz eta trantsizio energetikoan lagunduz. Hala eta guztiz ere, garapen horrek tokiko testuingurura egokitzea eskatuko du, bai eta esparru arautzailean aurrerapenak, gizartearen onarpena erraztuko duten estrategiak eta ezarpena erraztuko duten pizgarri espezifikoen diseinua ere.

Gako-hitzak: Agriboltaika, energia fotovoltaikoa, lurzoruaren erabilera, trantsizio energetikoa, Euskadi, analisi konparatiboa.

1. Introducción

En las últimas décadas, la transición energética se ha convertido en uno de los grandes retos a nivel global, impulsada por la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar hacia modelos más sostenibles de producción y consumo de energía. En este contexto, la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una de las principales alternativas renovables para producir electricidad debido a su disponibilidad y a la reducción progresiva de sus costes. Sin embargo, su expansión a gran escala plantea un problema creciente: la ocupación de suelo, especialmente en zonas con valor agrícola.

Este potencial conflicto entre la producción energética y la actividad agraria pone de manifiesto la necesidad de buscar soluciones que permitan compatibilizar ambos usos sin comprometer la seguridad alimentaria ni la sostenibilidad del territorio. Ante esta situación, surge la agrivoltaica, una propuesta que integra sistemas fotovoltaicos con actividades agrícolas o ganaderas en un mismo espacio, permitiendo un aprovechamiento dual del suelo.

Durante los últimos años, la agrivoltaica ha experimentado un notable desarrollo en Europa, con numerosos proyectos piloto que han demostrado su potencial tanto desde el punto de vista energético como agronómico. No obstante, la mayoría de estos proyectos se han llevado a cabo en entornos con condiciones climáticas, estructuras agrarias y marcos regulatorios muy específicos, lo que dificulta su aplicación directa en otros territorios.

Euskadi presenta un perfil singular: radiación solar moderada y principalmente difusa, una estructura agraria fragmentada basada en la pequeña explotación familiar y una superficie agrícola escasa y concentrada principalmente en Álava. Además, aunque la política energética autonómica reconoce la fotovoltaica como la fuente renovable con mayor potencial de nueva capacidad a instalar, todavía carece de instrumentos específicos para impulsar la agrivoltaica. Todo ello hace que la transferencia de modelos europeos al contexto vasco no pueda realizarse por extrapolación directa, sino que requiera un análisis de compatibilidad riguroso y orientado al territorio.

El presente trabajo tiene como objetivo general analizar distintos proyectos agrivoltaicos desarrollados en Europa con el fin de identificar aquellos modelos que podrían adaptarse al contexto agroclimático y socioeconómico de Euskadi. Para ello, se estudian distintas tipologías de sistemas, se analizan casos reales y se evalúan sus resultados en términos técnicos, productivos y de gestión. A partir de este análisis, se valora su posible transferencia al territorio vasco.

Con ello, este trabajo busca aportar una visión crítica y aplicada sobre el papel que la agrivoltaica puede desempeñar en Euskadi, no solo como herramienta para la generación de energía renovable, sino también como una oportunidad para reforzar la sostenibilidad y resiliencia del sector agrario.

Los casos de estudio seleccionados son cinco proyectos europeos, en funcionamiento o en fase de investigación aplicada, analizados mediante una matriz comparativa. El análisis comparado permite identificar los patrones compartidos, las divergencias significativas y aspectos relevantes para su posible implantación en territorio vasco.

2. Contexto

2.1. Contexto global

El crecimiento exponencial de la demanda energética mundial está estrechamente vinculado al aumento de la población, que según las Naciones Unidas crece a un ritmo del 1,15 % anual, lo que implica que la producción de alimentos deberá incrementarse un 70 % entre 2005 y 2050 para alimentar a los aproximadamente 9.100 millones de personas proyectadas [1]. En paralelo, la transición hacia las energías renovables se ha convertido en una prioridad estratégica: el objetivo global de alcanzar al menos el 27 % de utilización de energía renovable para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero sitúa a la energía solar en un papel central, estimándose que las instalaciones fotovoltaicas podrían cubrir el 40 % de la producción renovable mundial para 2050 [2].

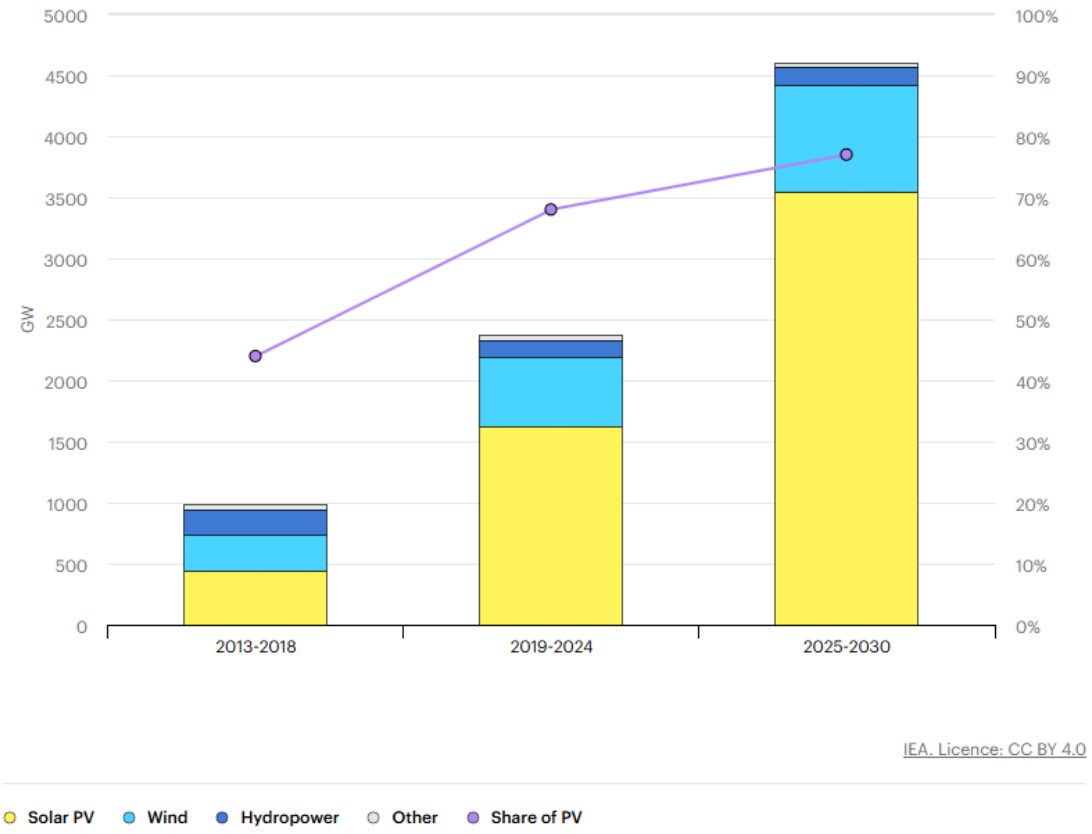


Ilustración 1. Crecimiento de la capacidad de electricidad renovable por segmento tecnológico y cuota de energía solar fotovoltaica 2013-2030 [3].

En este contexto la energía solar se ha consolidado como la fuente renovable más abundante y limpia, dado que los sistemas fotovoltaicos permiten transformar la radiación solar directamente en electricidad. La expansión de esta tecnología ha sido notable (Ilustración 2): la capacidad instalada superó los 760 GW al cierre de 2020, lo que representa un crecimiento de aproximadamente el 34 % respecto a 2018. Los tres mercados líderes, China, Europa y Estados Unidos, acumulaban en ese período 48,2 GW, 19,6 GW y 19,2 GW respectivamente. Dentro de esta expansión, las instalaciones fotovoltaicas en suelo representan el 94,2% de la capacidad total, frente al 5,58% correspondiente a cubiertas solares y el 0,22 % a instalaciones flotantes [4].

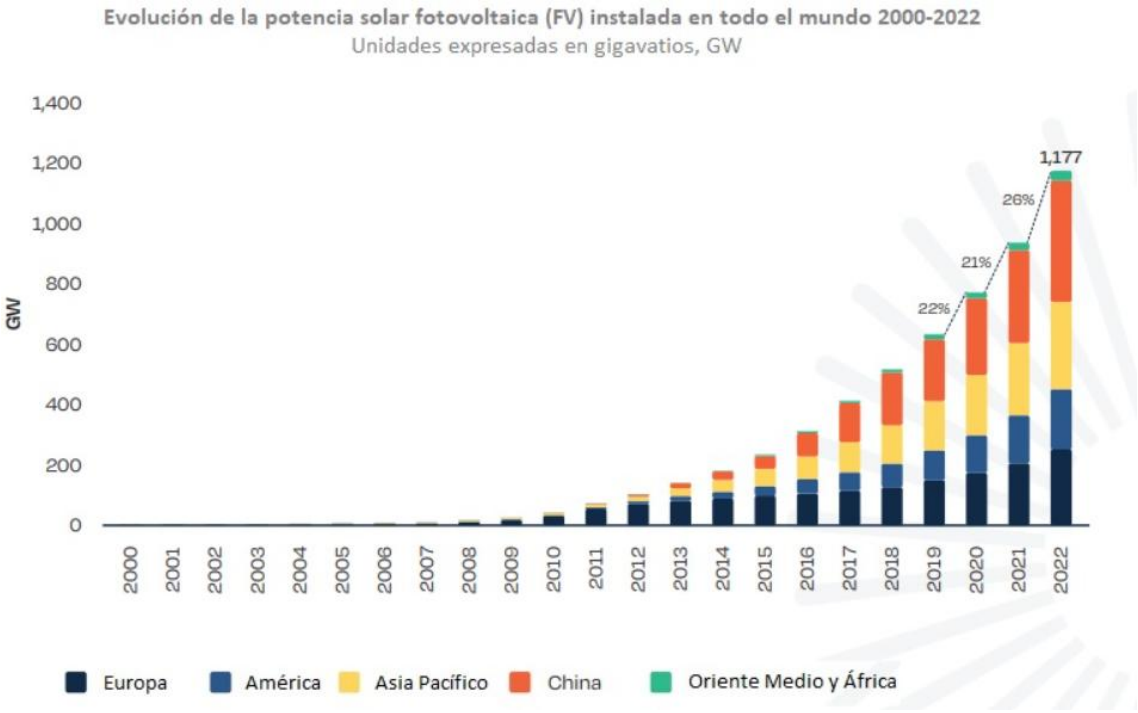


Ilustración 2. Evolución de la potencia solar fotovoltaica instalada en todo el mundo entre 2000 y 2022 [5].

2.2. Definición de agrivoltaica

El despliegue masivo de la tecnología fotovoltaica requiere en torno a 2 hectáreas por megavatio instalado, y la tendencia alcista en la demanda de terreno para nuevas instalaciones está generando una competencia creciente con el suelo agrícola y forestal, con implicaciones directas sobre la seguridad alimentaria y los recursos naturales. El sector agrícola, que actualmente ocupa el 12 % de la tierra arable del planeta, unos 1.600 millones de hectáreas, se sitúa así en el centro de este conflicto, configurando un escenario en el que la producción de alimentos y la generación de electricidad compiten directamente por un recurso cada vez más escaso [1].

La aceleración en la construcción de plantas de energía solar, impulsada por las políticas nacionales de transición energética, ha incrementado la demanda de suelo para nuevas instalaciones, aumentando el riesgo de ocupación de tierras agrícolas productivas. Esta tendencia puede traducirse en situaciones de inseguridad alimentaria en determinadas zonas, especialmente en regiones donde la disponibilidad de suelo cultivable es limitada [4].

Frente a esta tensión entre generación renovable y preservación del suelo agrícola, la instalación de paneles fotovoltaicos en tierras de cultivo como tecnología complementaria se plantea como un enfoque de elevada eficiencia potencial, al integrar en un mismo espacio la generación de energía y la producción agrícola. Un sistema agrivoltaico, también denominado agrofotovoltaica, Agri-PV o *solar sharing*, es precisamente aquel que hace posible este doble aprovechamiento del territorio, combinando la producción de energía solar fotovoltaica y el cultivo agrícola en una misma localización [6].

Los antecedentes del concepto se remontan a 1982, cuando Goetzberger y Zastrow diseñaron una configuración FV elevada dos metros sobre el suelo con seis metros de separación entre filas de paneles, lo que permitía una penetración suficiente de radiación solar para el crecimiento vegetal, y realizaron los primeros cálculos sobre transmisión de luz y efectos estacionales de la radiación

[6]. Dos décadas más tarde, en 2004, Japón desarrolló un prototipo de sistema agrivoltaico compuesto por múltiples instalaciones bajo el concepto de *solar sharing*, que se fue perfeccionado hasta superar el millar de emplazamientos en ese país. El término "sistema agrivoltaico" tal y como se emplea hoy fue formalizado en 2011 por Dupraz et al., quienes desarrollaron modelos para predecir el rendimiento de los cultivos bajo paneles fotovoltaicos y estimar la electricidad generada frente a sistemas de producción agrícola convencional, demostrando que la coproducción podía incrementar la productividad del suelo entre un 35 % y un 73 % [4].

A escala urbana, investigaciones realizadas en la ciudad de Shenzhen, China, han demostrado que la implantación de sistemas agrivoltaicos en cubiertas puede generar volúmenes de producción hortícola muy superiores a la demanda local, abriendo nuevas posibilidades para la agricultura urbana integrada con la generación renovable. No obstante, el éxito de las iniciativas agrivoltaicas no depende únicamente de las políticas gubernamentales, sino también de la mejora del entendimiento mutuo entre agricultores y propietarios de instalaciones eléctricas, cuya colaboración resulta determinante para la viabilidad operativa de los proyectos [4].

2.3. Desarrollo reciente en Europa

Aunque el liderazgo global en investigación agrivoltaica ha correspondido hasta ahora a China y Estados Unidos, Europa ha desempeñado un papel relevante en el avance técnico y experimental de la tecnología, y su adaptación a las condiciones locales está adquiriendo una importancia creciente. El compromiso europeo con los objetivos climáticos ha impulsado el desarrollo de proyectos e instalaciones de referencia en distintos países del continente.

Alemania destaca como referente gracias al proyecto APV-RESOLA del Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energía Solar, que desde 2016 opera la mayor instalación agrivoltaica de investigación del país junto al lago Constanza, proporcionando datos experimentales de referencia para el conjunto del sector [1]. El reconocimiento normativo alemán de la agrivoltaica se produjo de forma explícita con la reforma de la Ley de Energías Renovables, que entró en vigor en enero de 2021, incorporando la agrivoltaica al régimen de licitaciones con un volumen que se amplió de 50 a 150 MWp en junio de ese mismo año [7]. El ámbito de aplicación se extendió más allá de las tierras de cultivo para incluir superficies agrícolas de carácter permanente, aunque los pastizales permanentes quedaron excluidos del proceso. La gestión y definición de los criterios de elegibilidad fue encomendada a la Agencia Federal de Redes (BNetzA), con el objetivo de establecer los requisitos técnicos aplicables a las instalaciones participantes en las licitaciones públicas [8].

En Francia, el impulso normativo se articuló a través de un sistema de licitaciones competitivas gestionado conjuntamente por la Agencia de Transición Ecológica (ADEME) y la Comisión de Regulación de la Energía (CRE). Entre 2017 y 2020 se celebraron tres convocatorias sucesivas con una dotación progresivamente creciente, hasta alcanzar los 80 MWp específicos para agrivoltaica en la tercera ronda. La empresa Sun'Agri emergió como principal referente del sector, adjudicándose en torno a 58 MWp y ganando 22 de los 31 proyectos seleccionados en ese período [8].

En España, investigaciones realizadas en la región de Córdoba han explorado la integración de cultivos de olivo en sistemas de seguimiento horizontal, mientras que análisis sobre invernaderos en el sureste del país apuntan al potencial de la tecnología para reducir significativamente las emisiones de efecto invernadero [1].

En Europa central, Hungría ha abordado la adaptación de los sistemas agrivoltaicos a condiciones de mayor insolación y frecuencia de olas de calor, en combinación con los tipos de cultivo predominantes en la región [6]. Países como Italia, Bélgica, Suecia, Dinamarca y Portugal cuentan ya con instalaciones documentadas que cubren una amplia variedad de configuraciones estructurales y tipos de cultivos, como se recoge en detalle en el apartado 5.1 de este documento.

La colaboración científica entre distintos países europeos está contribuyendo a consolidar una base de conocimiento común cada vez más completa que integran los aspectos energéticos, económicos, ambientales y sociales de estos sistemas. Este dinamismo posiciona a Europa como un actor relevante en el desarrollo y consolidación de la agrivoltaica como tecnología de referencia para las próximas décadas [1], [6]. En la Ilustración 3 se muestra un resumen de la evolución de la agrivoltaica desde su aparición hasta el año 2024.

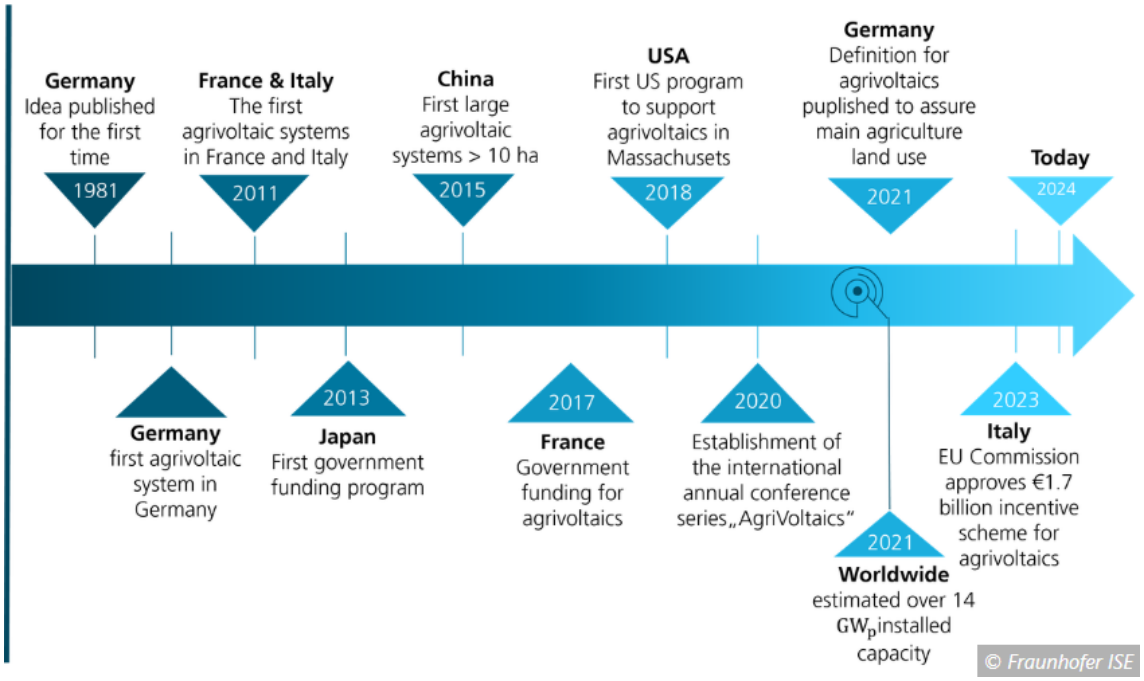


Ilustración 3. Historia del desarrollo agrivoltaico [9]

3. Objetivos y alcance del trabajo

3.1. Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo general evaluar proyectos demostrativos de agrivoltaica desarrollados en Europa, con el fin de identificar modelos técnica y agronómicamente replicables y adaptables al contexto específico de Euskadi, atendiendo a sus condiciones climáticas, agrarias y regulatorios particulares.

3.2. Objetivos específicos

Para dar respuesta al objetivo general, el trabajo se organiza en torno a seis objetivos específicos.

O.E.1 Caracterizar la agrivoltaica como tecnología de coproducción energético-agrícola, distinguiendo entre las principales tipologías de instalación existentes y los usos agrícolas con los que se asocian, incluyendo tanto producciones vegetales como aprovechamientos ganaderos.

O.E.2 Analizar los efectos de la coproducción en sistemas agrivoltaicos, tanto los beneficios documentados como los posibles impactos negativos relacionados con el rendimiento de los cultivos, la complejidad operativa y el uso del suelo.

O.E.3 Identificar los factores de éxito y las barreras que condicionan la viabilidad y escalabilidad de los sistemas agrivoltaicos, atendiendo a cuatro dimensiones: técnica, económica, social y regulatoria.

O.E.4 Mapear proyectos demostrativos europeos y analizar una muestra representativa, con atención a las tecnologías empleadas, los resultados productivos obtenidos tanto en el plano agrícola como energético, y los modelos de gestión adoptados.

O.E.5 Evaluar la compatibilidad de los proyectos analizados con el territorio de Euskadi, considerando tanto las condiciones climáticas del territorio como sus características agrarias, entre las que destacan la predominancia de cultivos de secano y huerta, la pequeña escala de explotación y el modelo de caserío.

3.3. Alcance y limitaciones

Este trabajo constituye un TFG del Grado de Ingeniería en Tecnología Industrial de la Escuela de Ingeniería de Bilbao con una dedicación de 150 horas, lo que condiciona de manera directa tanto a su alcance como a la profundidad con la que se abordan algunos aspectos.

El estudio cubre la caracterización teórica de la tecnología agrivoltaica y el análisis comparado de cinco proyectos europeos. Cabe señalar, que el trabajo se basa exclusivamente en el análisis de fuentes secundarias: no se incluye trabajo de campo, entrevistas ni modelizaciones propias. Asimismo, la selección de los casos de estudio es representativa, no exhaustiva.

4. Beneficios que aporta el trabajo y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los sistemas agrivoltaicos están siendo reconocidos de forma creciente como una solución clave para abordar simultáneamente los objetivos de seguridad alimentaria y energía limpia. Según la FAO e IRENA (2021), la integración de energías renovables en los sistemas agroalimentarios contribuye al cumplimiento del Acuerdo de París y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, con un impacto más directo sobre el ODS 2 (Hambre Cero) y el ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante), incluyendo la meta de duplicar la productividad e ingresos de los pequeños agricultores para 2030 [6].

El despliegue global de estos sistemas ha experimentado un crecimiento exponencial que refleja tanto el interés científico como el impulso comercial hacia esta tecnología, pasando de apenas 5 MW instalados en 2012 a 2,8 GW en 2020 [1]. Este dinamismo evidencia el reconocimiento creciente de la agrivoltaica como una solución viable para abordar simultáneamente la escasez de suelo disponible, la seguridad alimentaria y los objetivos de descarbonización en el contexto del siglo XXI.

Más allá de la eficiencia territorial, la agrivoltaica contribuye activamente a la mitigación del cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la generación eléctrica convencional, y favorece la adaptación de los sistemas agrícolas a condiciones climáticas adversas al reducir la exposición de los cultivos a la radiación solar excesiva, al estrés térmico y a eventos meteorológicos extremos [1].

A nivel socioeconómico global, la agrivoltaica ofrece un potencial significativo para la generación de empleo, estimado entre cientos de miles y hasta más de 2,3 millones de persona al año asociados al despliegue a escala significativa [10]. En regiones sin acceso a la red eléctrica o con infraestructuras de transmisión deficientes, estos sistemas ofrecen además la posibilidad de electrificar operaciones remotas, reduciendo la dependencia de generadores diésel y el coste de extensión de líneas de transmisión, un aspecto de especial relevancia en países empobrecidos o del Sur Global, donde la seguridad energética y alimentaria son propiedades simultáneas [4]. Asimismo, la agrivoltaica contribuye a la estabilización de los ingresos agrícolas mediante la diversificación de fuentes de renta, reduciendo la vulnerabilidad de los agricultores frente a la volatilidad de los precios agrícolas y a los riesgos climáticos crecientes [11].

5. Estado del arte

5.1. Tipologías y clasificación de sistemas agrivoltaicos

Los sistemas agrivoltaicos pueden clasificarse en función de distintos criterios (Ilustración 4), como el tipo de aplicación, la configuración del sistema o la tecnología empleada. Esta diversidad de enfoques responde a la necesidad de adaptar el diseño a las condiciones agrícolas, climáticas y energéticas de cada caso.

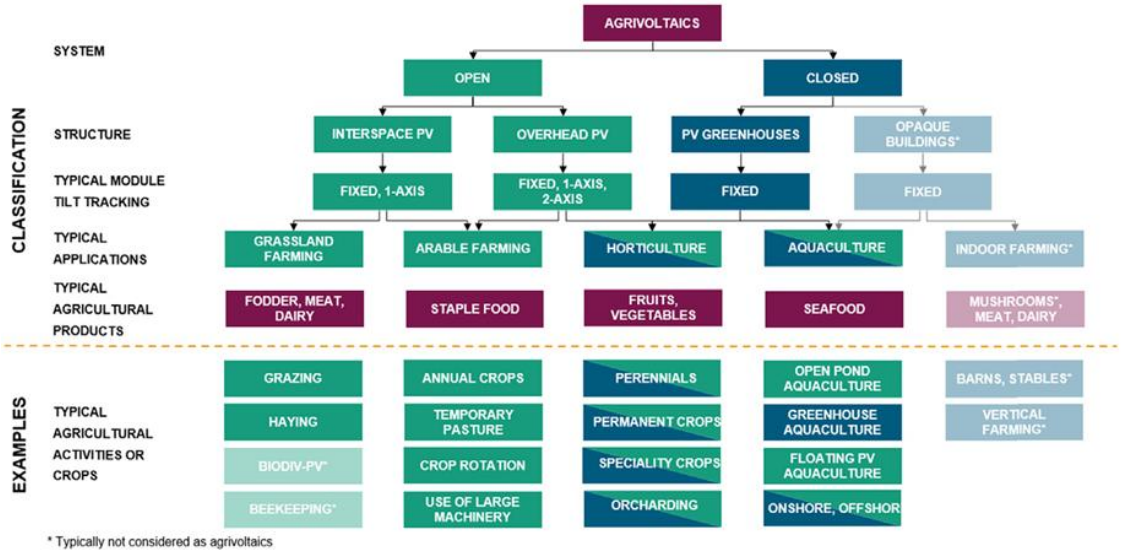


Ilustración 4. Clasificación amplia de los sistemas agrivoltaicos con ejemplos adecuados de los sistemas agrícolas empleados [8]

5.1.1. Según el tipo de aplicación

La literatura revisada identifica cuatro grandes tipologías de sistemas agrivoltaicos en función del tipo de actividad productiva con la que se integra la generación fotovoltaica: *livestockvoltaics*, *crop-based agrivoltaics*, *aquavoltaics* y *zoovoltaics* (Ilustración 5). Aunque cada una se aplica a entornos y especies distintas, todas comparten un principio en común: la integración simultánea de producción agrícola, ganadera o acuícola con generación fotovoltaica, aprovechando la sombra de los paneles para crear microclimas más estables y optimizar el uso del suelo o del agua [12].

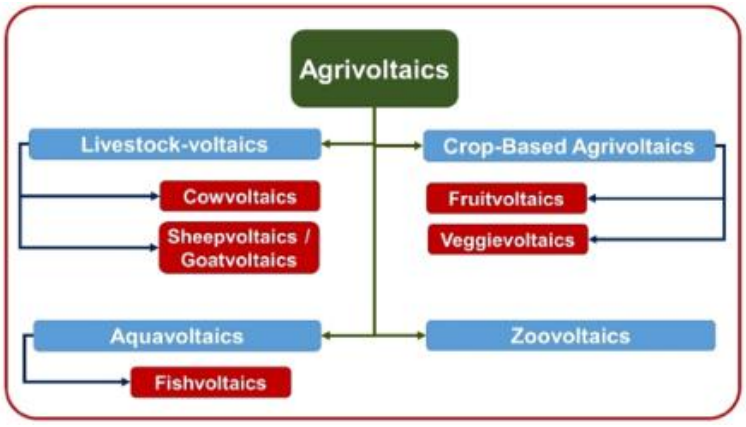


Ilustración 5. Clasificación de los agrivoltaicos [12].

Los sistemas ***livestockvoltaics*** o ganadería voltaica, integran paneles solares con ganadería extensiva, permitiendo que vacas, ovejas o cabras pasten bajo estructuras elevadas. Estos animales mantienen un control natural de la vegetación bajo los paneles, reducen los costes de mantenimiento mecánico de la cubierta vegetal y se benefician de la sombra generada por los módulos. La altura, inclinación y espaciado de los paneles son elementos clave para garantizar la movilidad del ganado y la seguridad de las instalaciones. Dentro de esta categoría se distinguen subcategorías como los *cowvoltaics* y los *sheepvoltaics*/*goatvoltaics* [12].



Ilustración 6. Diferentes tipos de ganado pastando bajo paneles solares [12]

Los sistemas ***crop-based agrivoltaics*** o agrivoltaica de cultivos, constituyen la modalidad más desarrollada y estudiada. Integran paneles elevados sobre cultivos frutales, hortícolas o herbáceos, permitiendo ajustar la densidad y orientación de los módulos para equilibrar la producción energética con las necesidades lumínicas de cada cultivo. Dentro de esta categoría se distinguen los *fruitvoltaics*, orientados a cultivos frutales y arbóreos, y los *veggievoltaics*, aplicados a hortalizas y cultivos herbáceos [12].

Los sistemas ***aquavoltaics*** o acuavoltaica, trasladan el concepto a entornos acuáticos, combinando paneles flotantes o elevados con estanques, jaulas marinas o instalaciones de acuicultura. El agua actúa como refrigerante natural, aumentando la eficiencia de los paneles. La subcategoría *fishvoltaics* integra directamente piscicultura y energía solar, proporcionando electricidad para sistemas de bombeo, filtración y aireación, lo que resulta idóneo en zonas remotas sin acceso a red eléctrica [12].

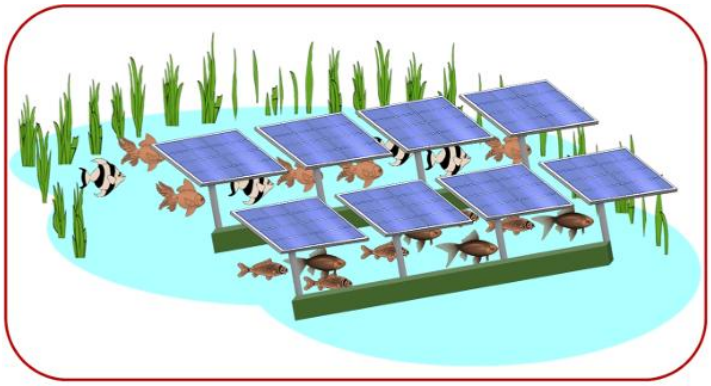


Ilustración 7. Diagrama esquemático del sistema acuavoltaico [12]



Ilustración 8. Imagen de la granja de peces de Star Acuacultura [12]

Los sistemas ***zoovoltaics*** o zoovoltaica, aplican los principios agrivoltaicos a zoológicos, reservas de fauna y jardines botánicos. Aunque es el subcampo menos desarrollado, presenta potencial para mejorar el bienestar animal mediante la creación de zonas sombreadas y microclimas más estables, al tiempo que permite reducir la huella energética de estas instituciones. Su implementación requiere adaptaciones específicas para cumplir con las normativas de bienestar animal y seguridad estructural [12].

A pesar de sus diferencias, las tipologías arriba descritas comparten beneficios estructurales comunes: una mayor eficiencia del uso del suelo o del agua, una reducción del estrés térmico, una mejora de la calidad del microclima y una generación de energía renovable que puede alimentar las propias operaciones agrícolas, ganaderas o institucionales. Sin embargo, también enfrentan desafíos comunes como la necesidad de diseños adaptados a cada especie o cultivo, los costes iniciales de infraestructura, las limitaciones normativas y la falta de estudios a largo plazo sobre impactos ecológicos y socioeconómicos [12].

5.1.2. Según la configuración estructural

La configuración estructural de un sistema agrivoltaico determina la geometría del espacio compartido entre la instalación fotovoltaica y la actividad agrícola. Esta clasificación atiende exclusivamente a parámetros físicos y constructivos: el grado de cerramiento, la disposición espacial de los módulos, su altura, densidad e inclinación, y el volumen resultante de su combinación. Estos parámetros condicionan directamente la cantidad de radiación que llega al cultivo, la posibilidad de mecanización y el tipo de actividad agrícola compatible con la instalación. En cualquier caso, independientemente de la configuración adoptada, la agricultura mantiene un papel relevante en todas ellas, especialmente en pastos y cultivos extensivos, incluso en aquellos diseños donde la producción eléctrica constituye el objetivo prioritario.

5.1.2.1. Distinción según el grado de cerramiento: sistemas abiertos (campo abierto) vs cerrados (invernaderos)

La primera distinción estructural relevante en la literatura es la que separa los sistemas agrivoltaicos en función de si se desarrollan en campo abierto o integrados en una estructura cerrada.

Los **sistemas abiertos** se desarrollan en campo abierto, sin cerramientos laterales ni envolventes que limiten el intercambio natural de aire, luz o humedad, aunque encerrando un volumen. Su diseño se basa en estructuras elevadas, espaciadas o permeables que facilitan la continuidad de las labores agrícolas tradicionales, incluyendo el uso de maquinaria, el tránsito de personas, y en algunos casos, el pastoreo (Ilustración 9). Pueden incorporar elementos como monitorización

pedoclimática[1], recolección de agua de lluvia o estrategias de gestión del microclima[2], además de emplear paneles fijos, inclinados o con seguimiento solar para regular la radiación disponible sobre el cultivo. [3]

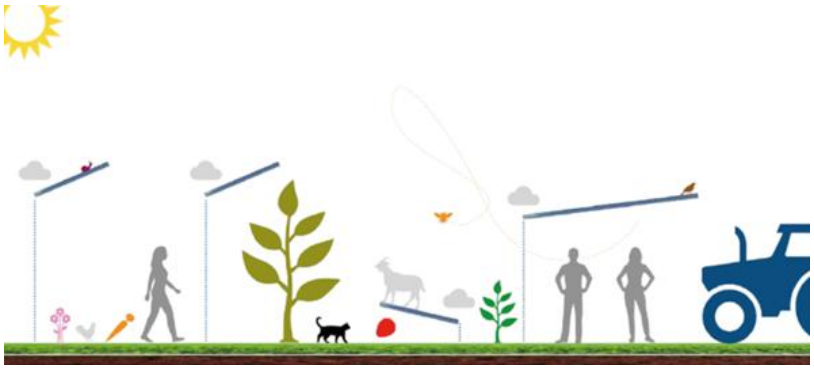


Ilustración 9. Representación tridimensional que destaca cómo diferentes configuraciones pueden apoyar la agricultura y la ganadería [7].

Los **sistemas cerrados** se caracterizan por la integración de los módulos fotovoltaicos en estructuras cubiertas, principalmente invernaderos o instalaciones ganaderas, donde los paneles forman parte de la cubierta superior. Esta configuración modifica la transmisión de luz y las condiciones microclimáticas internas, permitiendo un control más preciso sobre variables como la temperatura, la humedad o la radiación incidente, lo que resulta especialmente adecuado para cultivos sensibles o de alto valor añadido. La eficiencia agronómica del sistema cerrado depende en gran medida del diseño de la cubierta fotovoltaica, ya que la distribución, densidad y orientación de los módulos determinan la cantidad de luz disponible para los cultivos. Se ha observado que un aumento del 10% en la superficie cubierta por paneles puede reducir aproximadamente un 8 % la radiación incidente, por lo que es habitual emplear configuraciones parciales o distribuciones específicas que permitan equilibrar la producción energética con las necesidades fotosintéticas del cultivo.

La distinción entre sistemas abiertos y cerrados es fundamental para el diseño y la evaluación de proyectos agrivoltaicos, ya que condiciona la selección de cultivos, la geometría del sistema fotovoltaico, el nivel de sombra admisible, y la viabilidad productiva y energética del sistema [7].

[1] En el contexto de la agrivoltaica, las variables pedoclimáticas son aquella relacionadas tanto con el suelo (pedo-) como con el clima (-climáticas), ya que ambos factores condicionan el crecimiento de los cultivos y el funcionamiento del sistema agrivoltaico. Algunas variables del suelo (pedológicas): Humedad del suelo; Temperatura del suelo; pH; Conductividad eléctrica; Contenido de nutrientes; Materia orgánica; Compactación o estructura del suelo. Algunas variables climáticas: Temperatura del aire; Humedad relativa; Radiación solar; Velocidad y dirección del viento; Precipitación; Evapotranspiración.

[2] Dado que los paneles modifican las condiciones ambientales bajo ellos, creando un microclima particular, para la gestión del microclima en agrivoltaica suelen monitorizarse variables como las siguientes: Reducción de la radiación incidente; Temperatura bajo los módulos frente a zonas sin sombra; Humedad ambiental; Humedad del suelo bajo y fuera de los paneles; Estrés hídrico de los cultivos.

[3] El concepto de volumen agrivoltaico, se entiende como la representación tridimensional del espacio generado por la combinación de paneles, estructuras de soporte y áreas libres entre y bajo los módulos. Este enfoque permite planificar el uso del espacio para integrar cultivos, ganado, maquinaria y otras funciones complementarias de forma simultánea. Desde el punto de vista estructural, este volumen define la relación entre la instalación fotovoltaica y la actividad agrícola, y constituye un elemento central en el diseño de sistemas agrivoltaicos abiertos [7], ya que obliga a considerar conjuntamente la geometría del panel, la altura de la estructura y la anchura de los pasillos entre hileras como un espacio tridimensional funcional y no como parámetros independientes.

5.1.2.2. Distinción según la disposición espacial y altura de instalación

Dentro de los sistemas abiertos, la disposición espacial de los módulos y su altura sobre el suelo constituyen los dos parámetros geométricos más determinantes para la compatibilidad entre la instalación fotovoltaica y la actividad agrícola. La literatura distingue dos grandes categorías.

Los **sistemas *interspace PV*** o interespaciados, sitúan la actividad agrícola entre las hileras de módulos fotovoltaicos instalados con estructuras de baja cota, generalmente a menos de dos metros del suelo. Presentan poca o nula altura libre bajo los paneles, lo que limita el uso de maquinaria y condiciona el tipo de cultivo que puede implantarse [8]. Su coste estructural es inferior al de los sistemas elevados, lo que los hace más accesible para explotaciones agrícolas con recursos limitados, y son especialmente utilizados en regiones áridas, donde la sombra generada contribuye a disminuir el estrés térmico [7].

Los **sistemas *overhead PV*** o elevados, elevan los módulos entre 2 y 6 metros, permitiendo que la actividad agrícola se desarrolle directamente bajo ellos. Esta mayor altura facilita el paso de maquinaria agrícola y la circulación de operarios o ganado, mejora la eficiencia del uso del suelo y aumenta la aceptación social al mantener visible la actividad agrícola [8]. La elevación incrementa además la ventilación y reduce el impacto directo de la sombra sobre cultivos sensibles [7]. La estructura elevada también permite integrar elementos como recolección de agua de lluvia, sistemas de riego y dispositivos de monitorización climática [8]. Estas estructuras se emplean cuando se busca compatibilizar cultivos de porte medio o alto con la instalación fotovoltaica, garantizando un equilibrio entre producción agrícola y generación energética [7].

La Ilustración 10 representa tres configuraciones agrivoltaicas, que ilustran distintos grados de sinergia entre la actividad agrícola y la instalación fotovoltaica, en función de cómo se distribuyen los módulos respecto al cultivo.

Tipo 1: los módulos se disponen inclinados y elevados, cubriendo de forma continua el cultivo de abajo (*overhead PV)*. Representa la máxima sinergia entre ambas actividades, ya que toda la superficie cultivada queda bajo el sistema fotovoltaico.

Tipo 2: los módulos se sitúan alternados con el cultivo, dejando franjas libres sin paneles entre zonas cubiertas (*interspace*). La agricultura y la fotovoltaica se alternan espacialmente reduciendo el sombreado, pero también la integración entre ambas funciones.

Tipo 3: los módulos se disponen en posición vertical entre filas de cultivo sin cubrirlo por arriba. Esta configuración excluye el pastoreo, ya que no es compatible con la circulación de ganado. Se asocia a los módulos bifaciales descritos posteriormente.

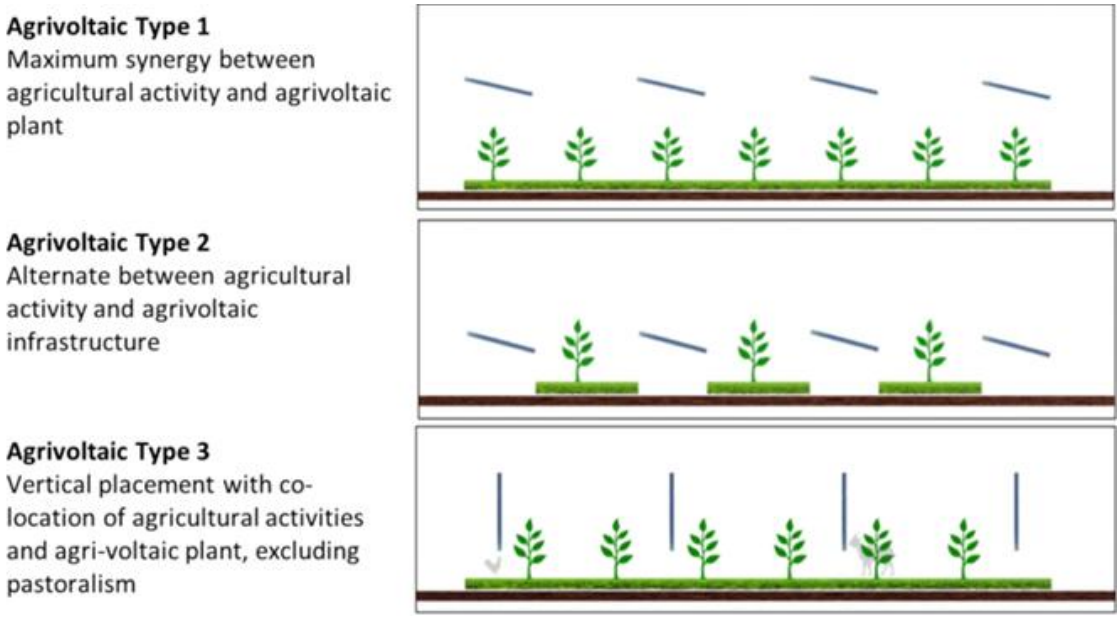


Ilustración 10. Configuraciones de sistemas agrivoltaicos basadas en ENEA [13]

5.1.2.3. Distinción según la densidad de módulos, orientación e inclinación fija

Una vez definida la disposición espacial y la altura del sistema, la densidad de módulos y su orientación e inclinación constituyen los parámetros geométricos que determinan la distribución de luz sobre el cultivo.

La **densidad de módulos** expresa el grado de cobertura del suelo por los paneles. Las configuraciones habituales permiten transmitir entre el 50 y 70 % de la radiación al cultivo, ajustándose en función de los objetivos productivos y de las necesidades lumínicas de cada especie. Esta flexibilidad estructural permite modular la sombra y adaptar el sistema a diferentes condiciones climáticas y agronómicas [7].

En cuanto a la **orientación e inclinación**, los sistemas inclinados emplean ángulos similares a los de plantas fotovoltaicas convencionales [8], permitiendo captar radiación solar y reduciendo al mismo tiempo el sombreado directo sobre el terreno [6]. La distribución de luz suele ser menos homogénea, lo que puede afectar a la maduración simultánea en cultivos donde esa uniformidad es esencial. Para mitigar estos efectos se incrementan las distancias entre filas, aunque esto reduce la eficiencia del uso del suelo [8]. La orientación y el ángulo de inclinación óptimos son parámetros determinantes tanto para la producción eléctrica como para el comportamiento agronómico del cultivo [6].

La Ilustración 11 muestra tres categorías principales de sistemas agrivoltaicos definidas por la norma alemana DIN SPEC 91434, que distingue las configuraciones según la altura de paso y la disposición de los módulos respecto al cultivo.

Los **módulos verticales bifaciales** orientados este-oeste genera un patrón de luz muy heterogéneo: sombra intensa por la mañana y tarde, y mayor iluminación al mediodía. El espacio entre filas puede oscilar entre los 6 y los 15 metros [8], facilitando la mecanización y el cultivo en las zonas intermedias [7]. En zonas ventosas, los módulos verticales actúan además como cortavientos, con efectos sobre la erosión y la evapotranspiración [8], que se abordarán en el apartado 3. Este tipo de estructura se ha implementado en países europeos para evaluar su rendimiento en cultivos como patata, heno o forraje [7].

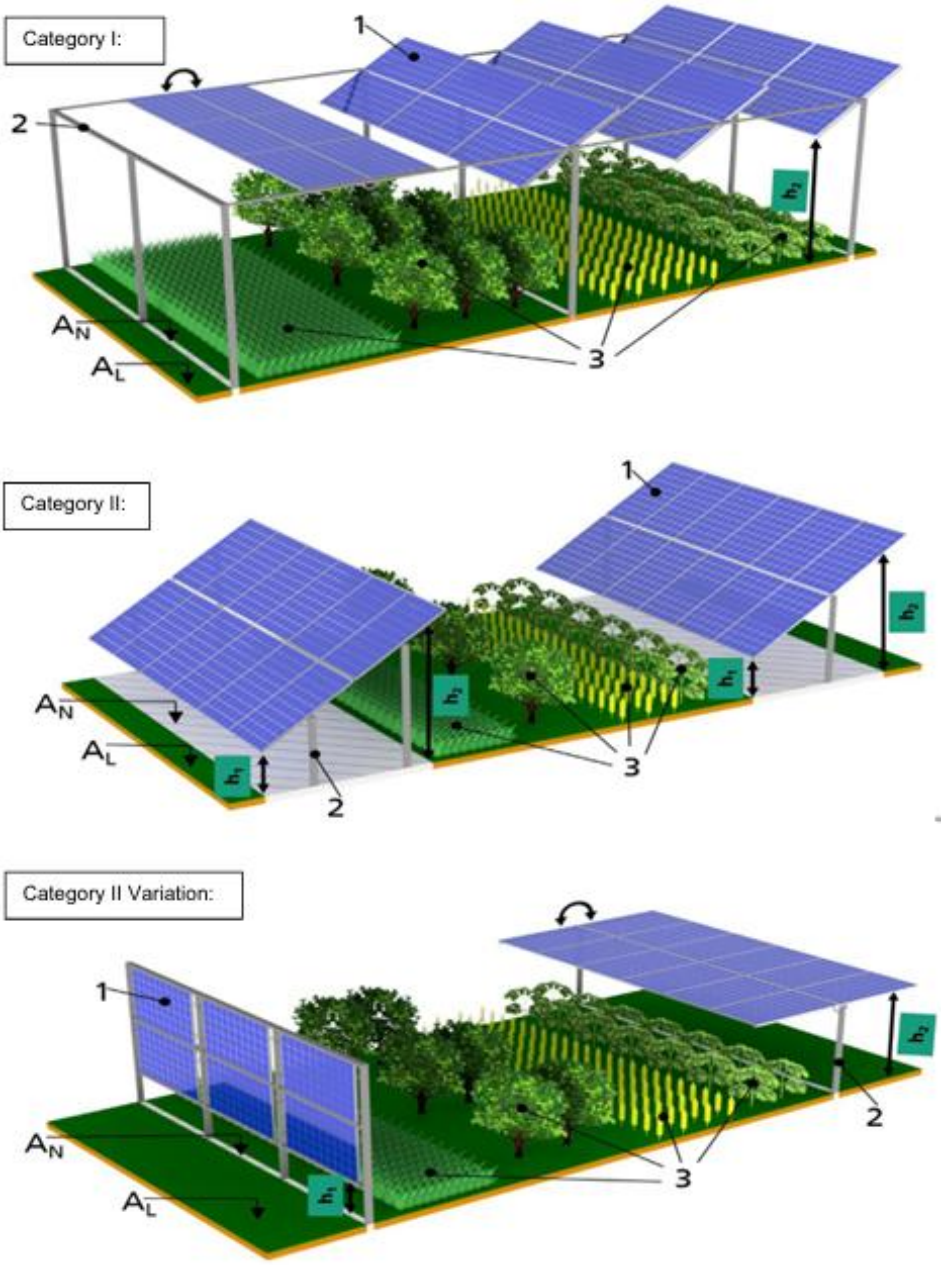


Ilustración 11. Sistemas agrivoltaicos principales según el 91434 DIN SPEC. [8]

Categoría I: los módulos están a una altura elevada mayor de 2,1 m sobre toda la parcela, dejando únicamente una zona de cultivo por debajo. Corresponde a un sistema *overhead* con máxima compatibilidad para maquinaria agrícola de gran tamaño y continuidad total del cultivo bajo los paneles.

Categoría II: combina dos alturas distintas dentro de una misma instalación. Una zona de paso bajo donde la altura es inferior a 2,1 m, donde se sitúa módulos a baja altura sobre un área no cultivable, y otra zona elevada, sobre el área cultivable. Es una configuración mixta entre *interspace* y *overhead,* que reduce el coste estructural en las partes donde no se requiere tránsito de maquinaria.

Categoría III: es una combinación de módulos verticales bifaciales en la zona de menor altura, junto con un sector *overhead* sobre cultivo. Esta forma permite aprovechar el espacio vertical para generar energía adicional, sin añadir sombreado significativo sobre el área cultivada.

5.1.3. Distinción según la tecnología de movimiento y funcionamiento

Más allá de la geometría estática del sistema, los módulos fotovoltaicos pueden clasificarse en función de su capacidad de movimiento a lo largo del día o de la temporada. Esta dimensión es independiente de la disposición espacial descrita en el apartado anterior: un sistema *overhead* puede ser fijo o dinámico, igual que un sistema *interspace*. La variable definitoria aquí es si el panel puede o no modificar su posición, y en qué grado de sofisticación lo hace.

5.1.3.1. Sistemas fijos

Los sistemas con paneles fijos representan la solución estructural más simple y extendida. Los módulos se instalan con una inclinación u orientación determinada, horizontal, inclinada, norte-sur o este-oeste, sin capacidad de movimiento. Su principal ventaja es el menor coste de instalación y mantenimiento, derivado de la ausencia de mecanismos móviles. Como contrapartida, generan patrones permanentes de sombra que no pueden adaptarse a las variaciones estacionales de la trayectoria solar ni a las necesidades lumínicas cambiantes del cultivo a lo largo de su ciclo fenológico. Estas configuraciones son especialmente comunes en instalaciones experimentales y en sistemas destinados a cultivos o usos ganaderos menos sensibles a la variabilidad lumínica [7].

5.1.3.2. Sistemas dinámicos

Los sistemas dinámicos incorporan mecanismos que permiten modificar la posición de los módulos, ya sea de forma continua o a lo largo del día mediante seguimiento solar activo, o de forma periódica mediante ajustes estacionales programados o manuales. En ambos casos, el objetivo es regular la cantidad de radiación que llega al cultivo y optimizar simultáneamente la producción energética, adaptando la disponibilidad de radiación solar a los requerimientos del cultivo en cada fase de su desarrollo [7].

5.1.3.3. Tracking de un eje (HSAT): ajuste estacional, programado y control avanzado

Los sistemas de seguimiento de un solo eje horizontal (HSAT) constituyen la configuración dinámica más habitual en agrivoltaica. Permiten ajustar el ángulo de inclinación de los paneles a lo largo del día sin necesidad de modificar el diseño estructural de la instalación, lo que los convierte en una plataforma especialmente adecuada para aplicaciones agrivoltaicas donde la gestión de la radiación disponible para el cultivo es tan relevante como la maximización de la producción energética [14].

Dentro de los sistemas HSAT se distinguen tres niveles de sofisticación creciente en las estrategias de control, que van desde el ajuste estacional hasta los algoritmos de optimización en tiempo real.

El **primer nivel** comprende las dos estrategias de referencia que representan los extremos del espectro (Ilustración 12). El seguimiento estándar (ST) orienta los paneles de forma perpendicular a los rayos solares a lo largo del día, maximizando la captación energética, pero generando una sombra considerable sobre el suelo, con reducciones de radiación a nivel del cultivo que pueden alcanzar el 35 %. El seguimiento inverso o anti-seguimiento (RT) alinea los paneles en la misma dirección que los rayos solares para maximizar la luz solar que llega a los cultivos inferiores, minimizando la sombra proyectada, aunque a costa de una pérdida energética muy significativa

que en algunos casos puede situarse por debajo del 15 % de la producción obtenida bajo ST. Ninguna de estas dos estrategias resulta óptima por sí sola para un sistema agrivoltaico que persiga simultáneamente objetivos agrícolas y energéticos [14].

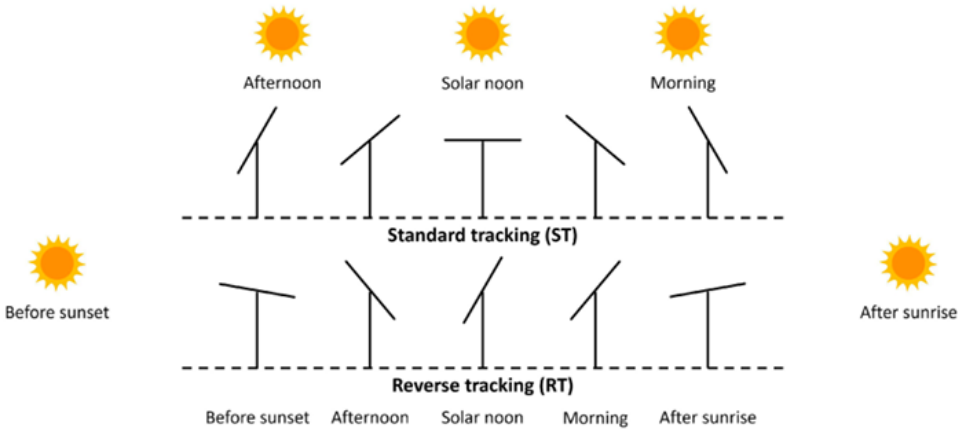


Ilustración 12. Estrategias estándar de seguimiento (ST) y de seguimiento inverso (RT) [14]

El **segundo nivel** corresponde a los esquemas de control basados en reglas heurísticas que combinan ST y RT en función de criterios predefinidos, como la aplicación de RT durante etapas críticas del ciclo fenológico del cultivo, durante períodos de bajo estrés hídrico y térmico, o en franjas horarias determinadas como la mañana y la tarde, reservando ST para las horas de mayor irradiancia. Estas estrategias han demostrado resultados prometedores en contextos experimentales: algunos estudios han conseguido recuperar hasta el 70 % del rendimiento energético del ST mientras se reducen las pérdidas de producción agrícola respecto al campo abierto. Su principal limitación reside en que las decisiones de control se toman sin considerar las condiciones climáticas futuras ni la variabilidad meteorológica en tiempo real, lo que las convierte en soluciones inherentemente subóptimas ante escenarios cambiantes [14].

El **tercer nivel** agrupa los marcos de control avanzado basados en técnicas de optimización formal. A diferencia de las reglas heurísticas, estos enfoques permiten que el ángulo de inclinación tome cualquier valor dentro del rango definido por ST y RT, buscando el equilibrio óptimo entre producción energética y disponibilidad lumínica para el cultivo en cada momento. Dentro de este nivel se distinguen dos componentes complementarios: un mecanismo proactivo, que utiliza pronósticos meteorológicos para planificar los ángulos de seguimiento con horizonte temporal largo, y un mecanismo reactivo, que monitoriza las condiciones en tiempo real y ajusta el objetivo de radiación acumulada diaria, expresada mediante el integral de luz diario, para compensar desviaciones respecto a lo planificado. El integral de luz diario se emplea como métrica de referencia por ser independiente de la especie vegetal, lo que otorga al marco una mayor generalidad sin necesidad de recurrir a modelos fisiológicos específicos de cada cultivo [14].

Cabe señalar que, aunque el seguimiento solar puede incrementar la generación de energía entre un 23 y un 26 % respecto a sistemas fijos [6], también puede reducir la luz disponible para el cultivo si no se gestiona adecuadamente [8], por lo que la elección de la estrategia de control tiene implicaciones directas sobre la productividad agrícola del sistema [6].

5.1.3.4. Tracking de dos ejes

Los sistemas de seguimiento de dos ejes permiten orientar los módulos tanto en el plano horizontal como en el vertical, siguiendo la trayectoria solar con mayor precisión que los sistemas de un eje. Esta configuración maximiza la captación energética a lo largo del día y del año, pero implica una

mayor complejidad mecánica, un coste de instalación y mantenimiento más elevado y una mayor ocupación del suelo por las estructuras de soporte necesarias. En el contexto agrivoltaico, su aplicación es menos frecuente que el HSAT, dado que la mayor complejidad estructural dificulta la compatibilidad con las labores agrícolas bajo los módulos [7].



Ilustración 13. Imagen de una central agrícola equipada con un sistema de seguimiento solar de doble eje [15]

5.1.4. Distinción según el nivel de integración tecnológica

Si el apartado anterior clasificaba los sistemas en función de si el panel puede o no moverse, este apartado atiende a una dimensión distinta: el grado de conectividad, automatización y capacidad de respuesta del sistema en su conjunto. Ambas dimensiones son independientes y complementarias.

5.1.4.1. Sistemas con sensórica y monitorización ambiental/pedoclimática

El primer nivel de integración tecnológica corresponde a los sistemas que incorporan instrumentación para la medición continua de variables del entorno agrícola y energético. Estos sistemas suelen combinar la instalación fotovoltaica con herramientas agrícolas como sistemas de riego [6], sensores, monitorización microclimática y otras herramientas de agricultura de precisión [8].

La integración de esta sensórica facilita un control más detallado del microclima bajo los paneles y permite ajustar las decisiones de gestión del cultivo con mayor precisión. Resulta especialmente útil en prácticas de agricultura de precisión donde el seguimiento continuo del entorno productivo es determinante para la calidad del producto final [6], como en el caso de viñedos, frutales o bayas [8]. El uso de sensores de radiación fotosintéticamente activa de bajo coste representa además una línea de avance activa en la literatura, orientada a hacer accesible esta monitorización a explotaciones de menor escala [10]. Estos sistemas forman parte de la categoría *overhead PV*, ya que la estructura elevada es la que permite físicamente integrar los dispositivos de medición junto a la instalación fotovoltaica sin interferir con las labores agrícolas [8].

5.1.4.2. Sistemas avanzados, automatización y algoritmos de control inteligente

El segundo nivel de integración tecnológica corresponde a los sistemas con capacidades de ajuste y tecnologías de monitorización. Estos sistemas combinan elementos estructurales propios de los *overhead PV* con seguimiento solar, sensórica integrada, riego inteligente y estrategias de protección frente a condiciones climáticas adversas como granizo, radiación excesiva o estrés térmico. Buscan maximizar la sinergia entre producción agrícola y generación eléctrica mediante un control más preciso de la radiación, el microclima y la gestión del agua [8].

En su forma más avanzada, estos sistemas incorporan también sistemas de fertiirrigación integrados en las propias estructuras de soporte de los paneles, captación y aprovechamiento del

agua de lluvia y sistemas de anclaje no invasivos que reducen la afección sobre el suelo agrícola y facilitan la reversibilidad de las instalaciones [10]. Representan una evolución hacia configuraciones más complejas y adaptadas a cultivos específicos, especialmente en horticultura y frutales, donde la calidad del producto depende en gran medida de las condiciones ambientales [8].

5.1.5. Distinción según la tecnología fotovoltaica o tipos de módulos

La selección del tipo de módulo fotovoltaico constituye uno de los factores determinantes en el diseño de un sistema agrivoltaico, ya que condiciona tanto la eficiencia energética como la cantidad y calidad de la radiación que llega al cultivo. La tecnología dominante en el mercado es el silicio cristalino (c-Si), que se presenta en tres variantes principales con aplicaciones diferenciadas en agrivoltaica: módulos monofaciales, bifaciales y semitransparentes. Como alternativa, los módulos de capa fina ofrecen características específicas que pueden resultar de interés en determinadas configuraciones [8].

Los **módulos monofaciales** son el tipo de sistema estándar del mercado fotovoltaico. Utilizan únicamente el lado frontal de los paneles para la radiación solar [8], por lo que su rendimiento depende exclusivamente de la irradiancia directa y difusa que incide sobre esa cara.

Los **módulos bifaciales** se distinguen de los convencionales por su capacidad de aprovechar la radiación incidente en ambas caras del panel [8]. Por la cara frontal reciben radiación directa del sol, radiación difusa dispersada por el cielo y radiación reflejada del suelo (albedo). Por la cara trasera, no reciben radiación directa, pero si difusa del cielo visible por detrás y radiación reflejada del suelo [14].

Este comportamiento hace que su rendimiento esté estrechamente ligado al albedo del entorno, que en contextos agrivoltaicos varía en función del tipo de suelo y del estado fenológico del cultivo, con valores que oscilan entre 0,15 en suelo desnudo y 0,28 en cultivos con alto índice de área foliar. La ganancia energética adicional que proporciona depende del factor de bifacialidad del módulo, es decir, de la relación entre la eficiencia de la cara trasera y la delantera, así como de la configuración de la instalación. En general, una mayor separación entre filas y una mayor altura de montaje favorecen esta ganancia, que puede verse incrementada adicionalmente mediante el uso de sistemas de seguimiento solar [8].

Desde el punto de vista tecnológico, los módulos bifaciales se fabrican principalmente mediante arquitecturas de células con pasivación trasera, como el contacto trasero y emisor pasivado (PERC) y emisor pasivado y trasero totalmente difuso (PERT), que permiten reducir las pérdidas de recombinación y mejorar la captación en la cara posterior. Las tecnologías de heterounión alcanzan los valores más altos de bifacialidad [8].

Los **módulos semitransparentes** de silicio cristalino incorporan un diseño en el que las células fotovoltaicas se distribuyen dejando espacios libres entre ellas, permitiendo el paso parcial de la radiación hacia el cultivo. Sus características ópticas, como el nivel de transparencia, la disposición celular, el color y el tipo de vidrio, son configurables, lo que otorga una notable flexibilidad de diseño para adaptarse a distintas necesidades agronómicas. Esta capacidad de transmitir luz de forma controlada resulta especialmente útil en instalaciones sobre huertos y cultivos arbóreos, donde mejora la uniformidad de la iluminación a nivel de planta. El vidrio entre células actúa simultáneamente como elemento de protección frente a condiciones climáticas adversas como el granizo o las lluvias intensas. Su principal limitación es que existe una relación inversa entre el grado de transparencia y la eficiencia de conversión energética, lo que obliga a

buscar un equilibrio entre ambos objetivos en función de las necesidades lumínicas del cultivo [8].

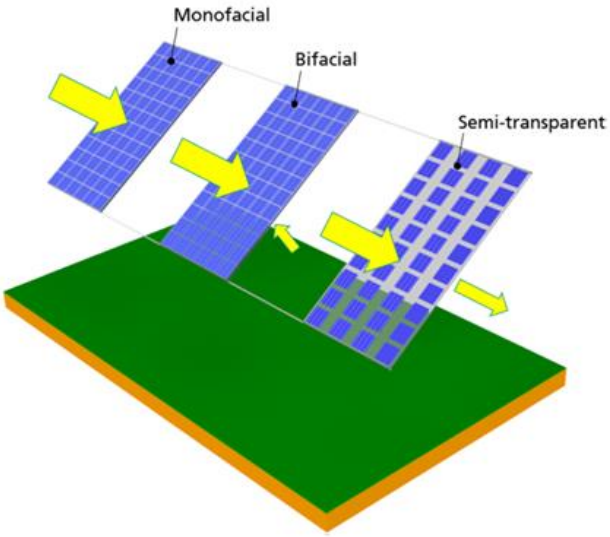


Ilustración 14. Tres módulos principales de c-Si utilizados en sistemas agrivoltaicos [8]

Los **módulos de capa fina** constituyen una alternativa tecnológica basada en materiales como el silicio amorfo (a-Si), el diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) o el telururo de cadmio (CdTe). Su principal ventaja frente al silicio cristalino reside en su flexibilidad de fabricación: admiten distintos tamaños, formas y grados de rigidez, e incluso pueden producirse con cierto nivel de semitransparencia reduciendo el espesor de la capa activa y empleando electrodos transparentes. Sin embargo, su eficiencia de conversión es inferior a la de los módulos c-Si, lo que limita su penetración en el mercado aun teniendo precios comparables, y restringe su aplicación en sistemas agrivoltaicos a configuraciones muy específicas donde su flexibilidad formal o su semitransparencia aporten un valor diferencial que no pueda obtenerse con las tecnologías de silicio cristalino [8].

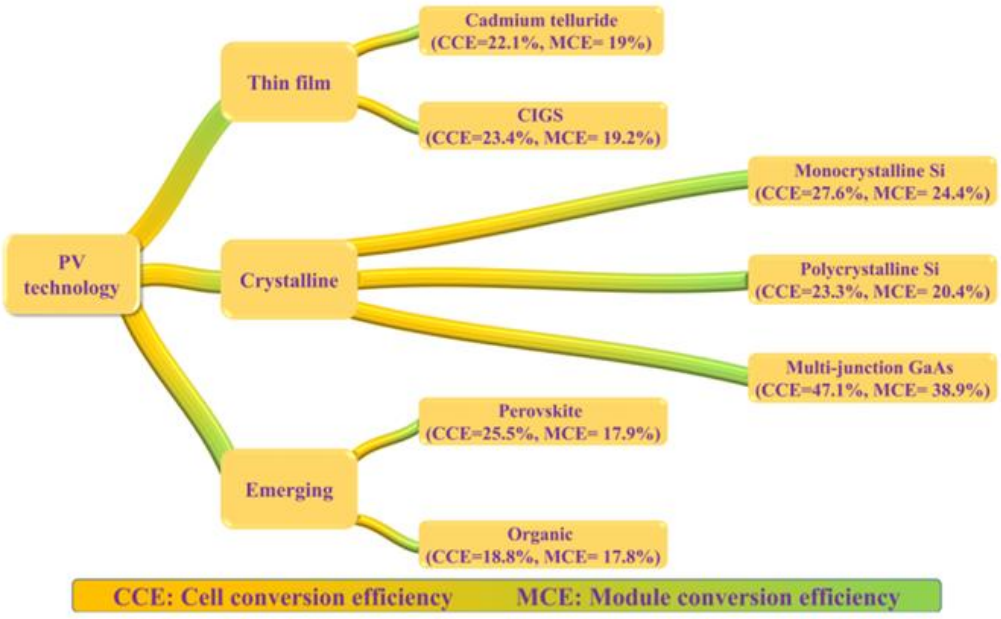


Ilustración 15. Esquemática de las categorías de tecnología fotovoltaica y sus respectivas eficiencias [16]

5.1.6. Tecnologías emergentes

Las tecnologías descritas en los apartados anteriores corresponden a soluciones ya presentes en el mercado o en fase experimental avanzada. Sin embargo, existe un conjunto de desarrollos tecnológicos que, aunque todavía no están ampliamente comercializadas, muestran un alto potencial específico para las aplicaciones agrivoltaicas. Su característica común es que no se limitan a adaptar módulos fotovoltaicos convencionales a un entorno agrícola, sino que rediseñan el propio módulo para optimizar simultáneamente la generación eléctrica y la transmisión de radiación útil para los cultivos, actuando directamente sobre el espectro o la geometría de la luz que atraviesa o rodea el panel [8].

Los **módulos concentradores con micro-tracking** han sido desarrollados por la empresa suiza Insolight, que emplea un conjunto de lentes en la cara frontal del módulo que concentran la radiación directa sobre células multijunción de elevada eficiencia. El sistema incorpora un mecanismo de *micro-tracking* en el plano del módulo, basado en pequeños desplazamientos del *backplane*, lo que permite mantener el punto focal sobre las células sin recurrir a estructuras móviles de gran tamaño externas al panel. Gracias a ello, estos módulos pueden instalarse en configuraciones estructuralmente fijas sin perder capacidad de concentración. [8].

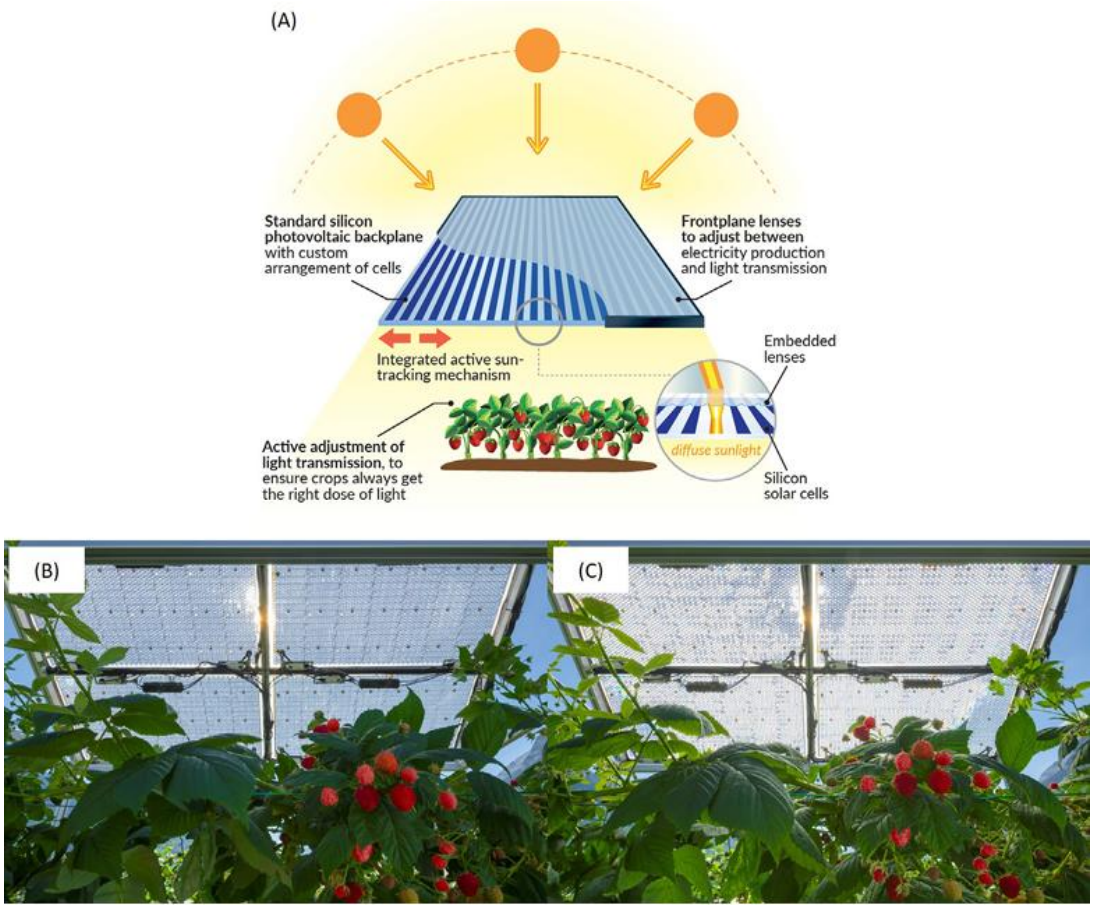


Ilustración 16. (A) Ilustración del módulo microconcentrador Insolight, (B) la luz directa se enfoca en las celdas: modo eléctrico o "modo E", y (C) la luz directa se enfoca entre las celdas: Máxima transmisión de luz "modo MLT" [8]

Los **módulos de fotovoltaica orgánica (OPV)** utilizan materiales orgánicos semiconductores cuyas propiedades ópticas pueden ajustarse durante la fabricación para controlar qué parte del espectro se absorbe para generar electricidad y cuál se transmite hacia el cultivo. Esta capacidad de sintonización espectral es su principal ventaja diferencial respecto a las tecnologías de silicio,

ya que permite diseñar módulos que absorben preferentemente las longitudes de onda no utilizadas por la fotosíntesis transmitiendo la radiación fotosintéticamente activa (400 – 700 nm) hacia las plantas. A esto se suma su ligereza, flexibilidad mecánica, que facilita su integración en estructuras de bajo peso. Actualmente existen aplicaciones comerciales orientadas principalmente a invernaderos, como las desarrolladas por la empresa ASCA [8].

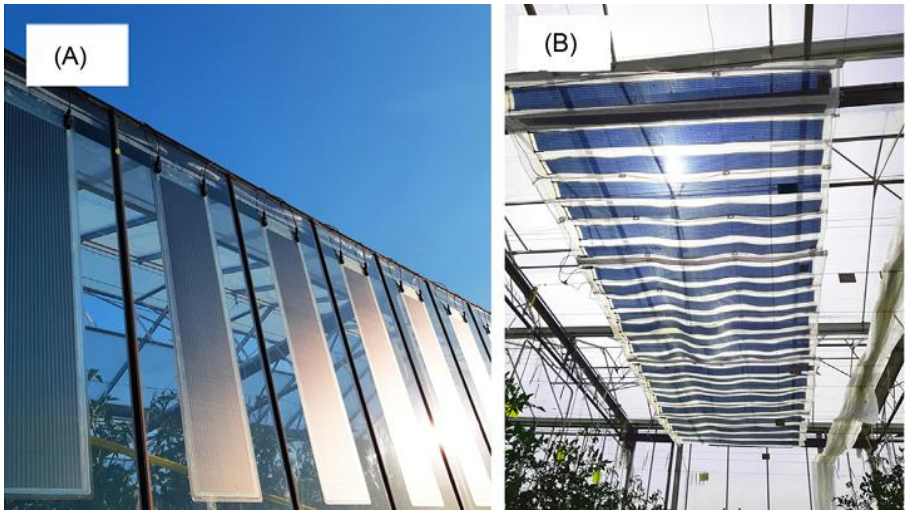


Ilustración 17. (A), (B) Módulos OPV desarrollados e implementados en un invernadero en Francia [8]

Los **colectores solares luminiscentes (LSC)**, impulsados por la compañía estadounidense Soliculture, integran materiales luminiscentes combinados con células cristalinas de baja densidad. Parte de la luz incidente es absorbida y reemitida por el material luminiscente, que la dirige hacia las células, mientras que el resto atraviesa el módulo y llega al cultivo. Este enfoque permite generar electricidad sin bloquear completamente la radiación útil para las plantas [8].

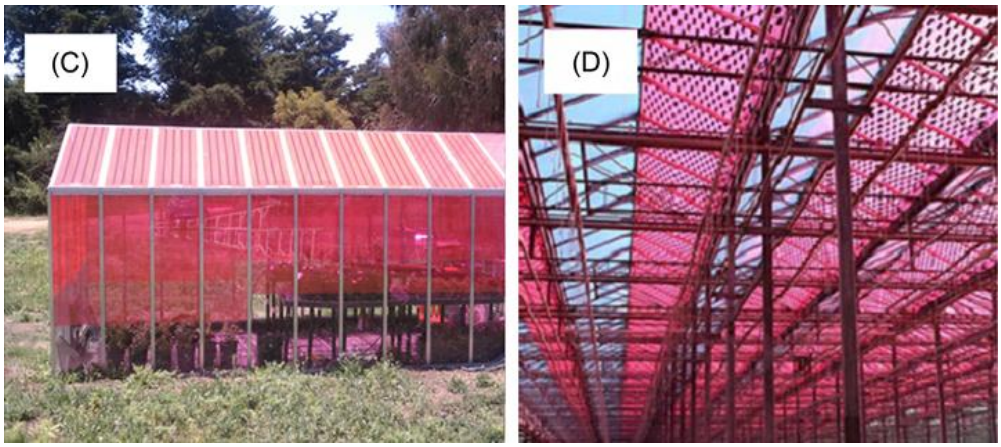


Ilustración 18. (C), (D) Módulos LSC Soliculture y su integración en un invernadero [8]

Los **sistemas centradores (CPV) especialmente selectivos (wavelength-selective CPV)**, utilizan espejos dicroicos capaces de separar la radiación solar incidente según su longitud de onda. El infrarrojo cercano (NIR) se refleja hacia las células fotovoltaicas bifaciales, mientras que el espectro visible se transmite hacia el cultivo. Esta tecnología ha sido construida y evaluada en China, mostrando resultados positivos en términos de compatibilidad entre producción agrícola y generación eléctrica [8].

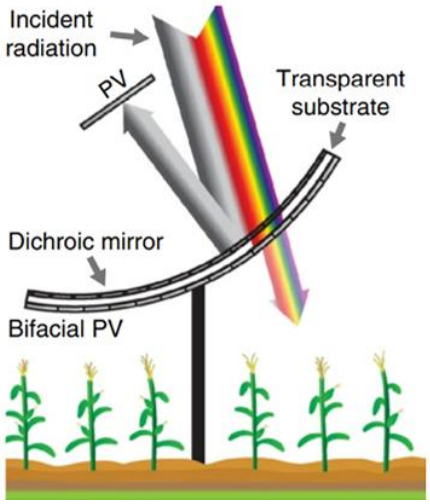


Ilustración 19. Módulo fotovoltaico concentrador con un espejo dicroico, permitiendo que el espectro PAR llegue a la planta mientras el NIR se refleja en una célula fotovoltaica [8]

Los **módulos tubulares** están desarrollados por la empresa alemana TubeSolar, basados en tecnología de fabricación de tubos fluorescentes de OSRAM/LEDVANCE. Su geometría cilíndrica genera un sombreado más uniforme sobre el suelo a lo largo del día, ya que la curvatura del tubo distribuye la sombra de forma continua en lugar de proyectarla en bandas discretas. Adicionalmente, la geometría tubular reduce la carga aerodinámica del viento sobre la estructura y permite emplear soportes más ligeros, lo que disminuye los costes de la instalación respecto a los sistemas de módulos planos equivalentes [8].

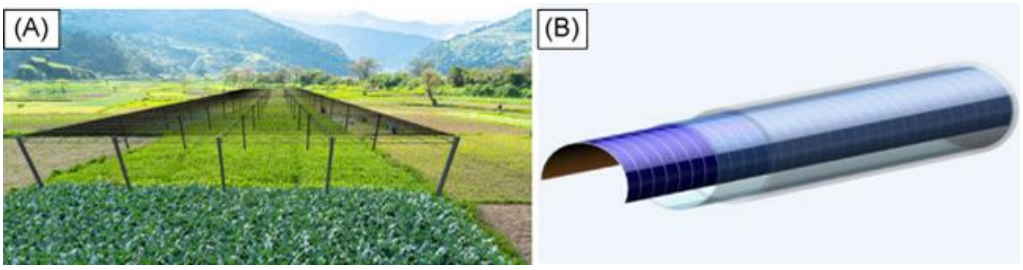


Ilustración 20. (A) Visualización de una instalación de módulos tubulares y (B) una vista más cercana de los componentes [8]

5.2. Interacción entre producción agrícola y generación energética

La relación entre la producción agrícola y la generación de energía en los sistemas agrivoltaicos es de naturaleza bidireccional y compleja. Los paneles fotovoltaicos modifican las condiciones microclimáticas bajo las que crecen los cultivos, mientras que la presencia de vegetación influye a su vez en el comportamiento térmico y energético de los módulos. Comprender esta interacción resulta fundamental para optimizar el diseño de los sistemas y maximizar los beneficios de la coproducción.

5.2.1. Efectos del sombreado y microclima

La configuración del sistema agrivoltaico, especialmente el grado de superficie agrícola cubierta por los módulos fotovoltaicos, condiciona en gran medida las modificaciones de los parámetros microclimáticos del entorno agrícola. En términos generales, los estudios han constatado que

tanto la humedad del suelo como la del aire tienden a ser más elevadas en los sistemas agrivoltaicos, mientras que las temperaturas del suelo y del aire presentan una menor variación a lo largo del día. Cuando la separación entre filas de paneles es mayor, aumenta la radiación solar a nivel del suelo, y este efecto se hace más pronunciado durante los meses de verano respecto a los de invierno [8].

5.2.1.1. Efectos sobre la radiación y densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD)

La reducción de la radiación solar disponible para los cultivos es uno de los efectos más directos e inmediatos del sombreado generado por los paneles. Esta reducción incide directamente sobre la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD)[4], que constituye la principal variable lumínica para los procesos fotosintéticos de las plantas. Bajo condiciones de cielo despejado, la radiación solar puede aproximarse a los 2.000 µmol/(m^2·s), mientras que bajo los paneles fotovoltaicos este valor puede verse reducido de forma significativa según la densidad y orientación de los módulos [7].

La respuesta de los cultivos a esta reducción lumínica varía notablemente entre especies: la tasa fotosintética es baja a bajos niveles de luz, aumenta linealmente con la intensidad luminosa hasta alcanzar un punto de saturación específico de cada especie, más allá del cual nuevos incrementos de irradiación no se traducen en mayores tasas de asimilación. En los sistemas agrivoltaicos, la luz que supera este umbral de saturación es interceptada por los paneles para producir electricidad, lo que convierte el sistema en una configuración de aprovechamiento complementario de la radiación [7].

5.2.1.2. Efectos sobre la temperatura del suelo y del aire

La exposición prolongada a la radiación solar directa y a altas temperaturas puede alterar la temperatura interna de las plantas, comprometiendo la eficacia fotosintética y la calidad de los productos agrícolas. Los paneles fotovoltaicos actúan como elementos de protección térmica, reduciendo las temperaturas máximas del aire y del suelo bajo el sistema, lo que puede resultar especialmente beneficioso en periodos de estrés por calor [7].

5.2.1.3. Efectos sobre la humedad del suelo y del aire

La humedad relativa del entorno tiene un impacto notable tanto sobre el cultivo como sobre el desempeño de los módulos fotovoltaicos [16]. En los sistemas agrivoltaicos, la humedad del suelo y del aire tiende a ser más elevada que en campo abierto como consecuencia directa de la reducción de la radiación incidente y de la menor evaporación superficial bajo los paneles [1]. Cuando es elevada, puede generarse una fina película de agua en la superficie frontal de los paneles que reduce la cantidad de irradiancia absorbida. Además, la entrada de humedad por la parte posterior del módulo acelera su degradación, favoreciendo fenómenos como la delaminación, la pérdida de pasivación y la corrosión de las conexiones. Diversos estudios experimentales han cuantificado este efecto, observándose disminuciones en la potencia de salida que van aproximadamente desde un 9,75 % con una humedad relativa del 60 % hasta un 32,24 % cuando alcanza el 90 % [16].

[4] La PPFD (*Photosynthetic Photon Flux Density*) o densidad de flujo de fotones fotosintéticos mide la cantidad de fotones PAR que llegan a una superficie determinada en cada segundo. Así, mientras que la PAR se refiere al rango espectral, la PPFD cuantifica la intensidad de esa radiación útil que realmente recibe la planta.

5.2.1.4. Efectos sobre el viento

La presencia de módulos verticales bifaciales orientados este-oeste en configuraciones *interspace* actúa como barrera cortavientos, reduciendo la velocidad del viento en las zonas de cultivo intermedias. Este efecto tiene implicaciones directas sobre la evapotranspiración del cultivo y sobre la erosión del suelo, especialmente en zonas expuestas con suelos ligeros o en pendiente [8]. La estructura de soporte de los sistemas *overhead* también puede modificar los patrones de circulación del aire bajo los paneles, incrementando la ventilación en comparación con cultivos en campo abierto sin cobertura, lo que contribuye a moderar las temperaturas máximas en periodos de calor intenso [7].

5.2.1.5. Efectos sobre la evapotranspiración y ahorro de agua

La evapotranspiración de los cultivos se ve reducida en los sistemas agrivoltaicos como consecuencia combinada de la menor radiación incidente, la reducción de la temperatura del aire y del suelo, y el efecto cortavientos de las estructuras. Este menor consumo hídrico es uno de los beneficios más documentados de la tecnología: en viñedos del sur de Francia se registró una reducción de entre el 12 % y el 34 % en la demanda de agua bajo sistemas agrivoltaicos [7]. A su vez, la evapotranspiración del cultivo contribuye al enfriamiento evaporativo de los propios módulos fotovoltaicos, cerrando el ciclo de interacción bidireccional entre el cultivo y los paneles, aspecto que se cuantifica en el apartado 5.2.3 [4].

5.2.2. Productividad agrícola y comportamiento fitotécnico

La respuesta de los cultivos al sombreado generado por los paneles fotovoltaicos no es uniforme ni predecible a partir de un único factor. Depende de la interacción entre las características fisiológicas de cada especie, el nivel de sombreado impuesto por el diseño del sistema, y las condiciones climáticas del emplazamiento, especialmente la disponibilidad de agua y la temperatura. Esta variabilidad explica por qué la literatura recoge simultáneamente resultados positivos, negativos y neutros sobre la productividad agrícola bajo sistemas agrivoltaicos, y por qué la selección del cultivo y el diseño del sistema son decisiones que se condicionan mutuamente.

5.2.2.1. Efectos positivos

La evidencia acumulada en la literatura científica indica que los sistemas agrivoltaicos pueden mejorar el rendimiento agrícola de forma significativa, especialmente en condiciones de estrés hídrico y térmico. En Alemania, cultivos como el trigo de invierno, las patatas o el apio nabo mostraron incrementos de rendimiento de hasta el 48 % en años especialmente secos y cálidos, cuando el sombreado contribuyó a reducir la evapotranspiración y a aliviar el estrés hídrico. En Estados Unidos, el tomate y el pimiento chiltepín registraron aumentos de rendimiento del 100 % y el 200 % respectivamente bajo tasas de sombreado elevadas, mientras que los pastos mostraron incrementos de biomasa de hasta el 90 %. En Italia, la biomasa del maíz aumentó entre 735 y 800 g/m^2, y cultivos de hoja como la lechuga y la achicoria mejoraron su rendimiento en un 10 % y un 69 % respectivamente [10].

La protección frente a eventos climáticos extremos como el granizo, las lluvias intensas y la radiación solar excesiva constituye otra ventaja documentada de estos sistemas, asegurando una producción de mayor calidad y estabilidad. En el caso de la viticultura, estudios realizados en viñedos del sur de Francia evidenciaron una mejora del perfil aromático de las uvas, con mayor contenido de antocianinas y acidez [7].

Desde el punto de vista de la calidad nutricional, se han registrado incrementos de hasta un 13,3 % en el contenido de vitamina C y un crecimiento del 15,6% en la propiedad antioxidante de los

tomates cultivados. También se han documentado mejoras en el contenido proteico de la albahaca y la espinaca, y aumentos en el número de flores y la superficie foliar en la achicoria [10]. En cuanto a la calidad del suelo, el contenido de carbono orgánico incrementó hasta un 14,94 %, y el carbono de la biomasa microbiana entre un 57,4 % y un 629 %, con mejoras similares en el nitrógeno y el fósforo de la biomasa microbiana [10].

5.2.2.2. Efectos negativos documentados

Según la literatura científica, los sistemas agrivoltaicos también pueden ocasionar reducciones en el rendimiento agrícola, especialmente cuando el nivel de sombreado supera los requerimientos de tolerancia de los cultivos. Los rendimientos revisados en la literatura fueron en general inferiores a los obtenidos en parcelas de control[5], con variaciones que oscilaron entre el 3,98 % y el 91,31 % de reducción. Esta disminución se atribuye fundamentalmente a la reducción de la irradiación solar directa disponible para los cultivos [4]. En el caso del maíz, cultivo con un punto de saturación lumínica más elevado que las plantas no C_4, el sombreado puede limitar la producción de biomasa de forma más pronunciada [8]. Estudios experimentales en Francia durante tres temporadas mostraron reducciones en el rendimiento de grano de entre el 22 % y el 80 % en función del nivel de sombreado aplicado. En viticultura a gran escala, las disminuciones de rendimiento pueden afectar la sostenibilidad económica del sistema, aunque en el segmento de vinos de alta gama, una menor producción puede traducirse en mayor concentración de compuestos aromáticos y mayor valor del producto [7]. El sombreado también puede ocasionar retrasos fenológicos, como los observados en el maíz, donde las etapas de emergencia y floración se retrasaron entre cinco y once días en función de la intensidad de sombreado aplicado [7].

5.2.2.3. Efectos neutros o dependientes del contexto documentados

Un conjunto significativo de estudios muestra que los efectos sobre la producción agrícola dependen en gran medida del contexto climático, el tipo de cultivo, el diseño del sistema y las condiciones específicas de cada temporada. El repollo cultivado en Corea del Sur mostró una reducción del rendimiento del 9,7 % sin que se observaran diferencias significativas en la calidad sensorial, la composición química o el perfil de glucosinolatos respecto al cultivo en campo abierto. El apio nabo cultivado en Alemania presentó resultados opuestos en dos años consecutivos: una reducción del 18,9 % en el primero año y un incremento del 11,8 % en el segundo, en función de las condiciones climáticas de cada temporada [7]. Estos resultados ilustran que el sombreado puede ser perjudicial cuando la disponibilidad de luz se sitúa por debajo del punto de saturación lumínica del cultivo sin que existan otros factores limitantes, pero beneficioso cuando la temperatura y el déficit hídrico actúan como factores restrictivos del crecimiento [8].

5.2.2.4. Respuesta fitotécnica al sombreado según el tipo de cultivo

La variabilidad de resultados descrita en los apartados anteriores responde en gran medida a las diferencias fisiológicas entre especies en cuanto a su tolerancia al sombreado.

Los cultivos **C_3**[6], entre los que se incluyen la lechuga, el tomate, la albahaca, la achicoria y la espinaca, han mostrado la mayor tolerancia al sombreado parcial, presentando mejoras en el área foliar, la fotosíntesis, la productividad y el tamaño del fruto como resultado de la menor exposición al estrés hídrico y a condiciones microclimáticas adversas. Su punto de saturación

[5] Una parcela de control en un sistema agrivoltaico es un área de terreno adyacente o integrada en la misma explotación dedicada al cultivo tradicional sin paneles solares. Sirve como base de referencia para evaluar el impacto real del subsistema fotovoltaico sobre el subsistema agrícola.

[6] Las plantas C_3 son aquellas en las que el primer compuesto estable que se forma contiene tres átomos de carbono. En el ciclo de Calvin la enzima fija el carbono, fija O_2 en vez de CO_2 provocando un desperdicio de energía. Representan alrededor del 89 % de todas las plantas vasculares, entre ellas la patata, trigo, cebada, soya, pimiento y tomate [39].

lumínica es relativamente bajo, lo que significa que en condiciones de plena exposición solar una parte significativa de la radiación recibida supera ya ese umbral y no se traduce en mayor fotosíntesis, siendo por tanto interceptable por los paneles sin penalizar el rendimiento del cultivo [7].

Los cultivos **C_4**[7], entre los que destaca el maíz, presentan un punto de saturación lumínica considerablemente más elevado, lo que los hace más sensibles a las reducciones de radiación impuestas por el sombreado. En estos cultivos, cualquier reducción de la irradiancia disponible tiende a traducirse de forma más directa en pérdidas de biomasa y rendimiento de grano, por lo que requieren diseños de sistema con menor densidad de paneles y mayor separación entre filas para minimizar las pérdidas productivas [7].

Los **cultivos frutales y arbóreos**, como la vid, el manzano o el peral, presentan una respuesta intermedia y fuertemente dependiente del manejo. En viticultura, el sombreado moderado puede mejorar el perfil aromático y la acidez de la uva, especialmente en climas cálidos donde el exceso de radiación y temperatura constituye un factor limitante de la calidad. Sin embargo, en producciones orientadas al volumen, las reducciones de rendimiento pueden comprometer la sostenibilidad económica del sistema [7].

Por este motivo, los sistemas agrivoltaicos resultan especialmente eficaces en climas cálidos y secos, donde el balance entre la reducción de radiación y la mejora de las condiciones hídricas y térmicas tiende a ser favorable para la mayoría de los cultivos. La selección de especies tolerantes a la sombra maximiza las probabilidades de obtener resultados positivos, mientras que cultivos con altos requerimientos lumínicos requieren un diseño más cuidadoso del sistema para evitar pérdidas de rendimiento significativas [8].

5.2.3. Producción energética y eficiencia del sistema

Si los apartados anteriores analizaban cómo los paneles modifican el entorno del cultivo, este apartado aborda la dirección inversa de la interacción: cómo la presencia del cultivo bajo los módulos influye sobre su rendimiento eléctrico. Esta sinergia térmica, en la que el ciclo hídrico y biológico del cultivo actúa como sistema de refrigeración pasivo de los paneles, constituye uno de los principales argumentos técnicos a favor de la integración agrivoltaica frente a las instalaciones fotovoltaicas convencionales en suelo [1].

En primer lugar, debe considerarse el efecto de la temperatura sobre la eficiencia del panel. La eficiencia de conversión de los paneles solares disminuye a medida que aumenta su temperatura de operación, con reducciones estimadas de entre el 0,05 % y el 0,5 % por cada grado centígrado de incremento [16]. En instalaciones fotovoltaicas convencionales en suelo, la ausencia de vegetación bajo los paneles implica que el suelo desnudo o la vegetación seca absorben y reemiten calor, elevando la temperatura del entorno inmediato de los módulos y penalizando su rendimiento energético [16].

En los sistemas agrivoltaicos la evapotranspiración del cultivo y la mayor humedad del suelo reducen la temperatura superficial de los módulos a través de procesos de enfriamiento evaporativo. Simulaciones microclimáticas realizadas mediante el modelo ENVI-met han estimado que la presencia de cultivos bajo los paneles puede reducir la temperatura entre 0,71 ºC en días nublados y 2,83 ºC en días soleados, con incrementos en la eficiencia del panel de entre

[7] Las plantas C_4 son aquellas cuya ruta fotosintética fija el CO_2 en un compuesto de cuatros carbonos antes de incorporarlo al ciclo de Calvin-Benson, lo que les confiere una mayor eficiencia en el uso del agua y una fotosíntesis más activa a altas temperaturas e irradiación intensa. Entre los cultivos de relevancia agroeconómica destacan el maíz, la caña de azúcar y el sorgo [39].

0,28 % y el 1,42 % según las condiciones de irradiación. Mediciones en condiciones reales de campo confirmaron reducciones de temperatura del módulo inferiores a 0,18 ºC atribuibles al cultivo, con una ganancia correspondiente de aproximadamente el 0,09 % en voltaje y potencia de salida [4]. Asimismo, se ha constatado que instalar el sistema a una altura de cuatro metros sobre el suelo puede reducir la temperatura de los módulos hasta 10 ºC respecto a instalaciones convencionales a menor altura, lo que representa una mejora significativa en la eficiencia de conversión energética derivada no solo del cultivo sino también de la mayor ventilación que permite la estructura elevada [1].

A partir de estos efectos térmicos, es posible cuantificar el beneficio energético global del sistema. En términos de producción energética acumulada diaria, esta sinergia entre cultivo y paneles se ha estimado en incrementos de entre un 3,05 % y un 3,2 % respecto a sistemas fotovoltaicos sin vegetación bajo los paneles [4].

Frente a las instalaciones fotovoltaicas convencionales en suelo, los sistemas agrivoltaicos presentan ventajas e inconvenientes que deben valorarse en conjunto. En términos de impacto ambiental y coste nivelado de la electricidad, (LCOE[8]) los resultados de ambos tipos de instalación son comparables, sin diferencias significativas que favorezcan claramente a ninguno de los dos modelos desde el punto de vista estrictamente energético [6]. Sin embargo, el valor diferencial de la agrivoltaica reside en la reducción de la ocupación neta del suelo, la mejora del rendimiento del panel por enfriamiento evaporativo del cultivo, y la estabilización de la producción agrícola que reduce la variabilidad de los ingresos totales del sistema [6]. La mayor parte de los sistemas agrivoltaicos existentes corresponde a proyectos de pequeña y mediana escala, con una exploración todavía limitada de instalaciones superiores a 1 MW [1].

5.3. Factores de viabilidad de sistemas agrivoltaicos

La viabilidad de un sistema agrivoltaico no depende exclusivamente de su rendimiento técnico o energético, sino de la interacción entre múltiples factores que abarcan desde la geometría del diseño hasta el marco regulatorio del emplazamiento. Este apartado aborda de forma analítica las dimensiones que determinan si un proyecto agrivoltaico es técnicamente sólido, económicamente rentable, socialmente aceptable y regulatoriamente viable. A diferencia del apartado 5.1, que describe qué tipos de sistemas existen, y del apartado 5.2, que analiza cómo interactúan físicamente con el cultivo, este apartado responde a la pregunta de cómo evaluar y decidir entre opciones en el contexto de un proyecto concreto.

[8] LCOE (*Levelized Cost of Energy*) es una métrica utilizada para evaluar el coste unitario de la electricidad generada por un sistema energético durante todo su ciclo de vida. Su cálculo considera el valor actualizado de todos los costes asociados al proyecto y el valor actualizado de la energía producida, proporcionando una estimación del coste medio de generación por unidad de energía. Este indicador facilita la comparación económica entre diferentes tecnologías energéticas, escalas de proyecto y alternativas de diseño."

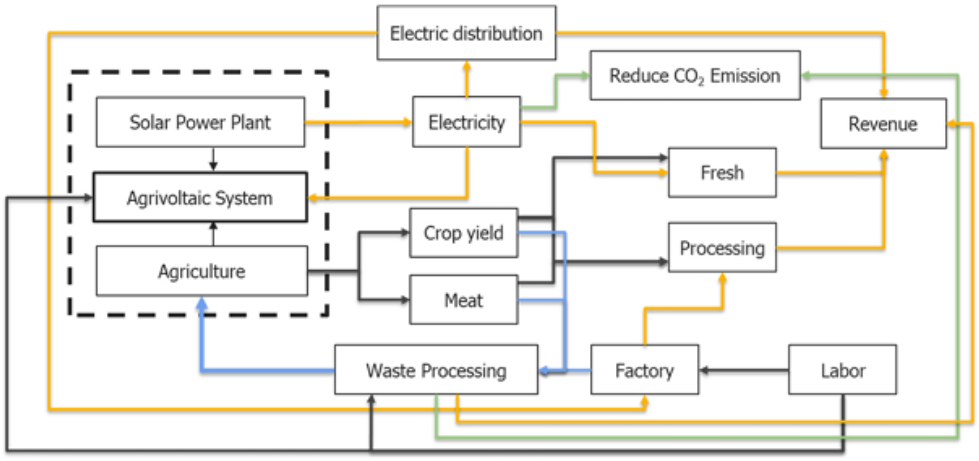


Ilustración 21. Relación entre energía, alimentación, medio ambiente y sociedad con el sistema agrícola [4].

5.3.1. Factores técnicos y métricas de diseño

El diseño técnico de un sistema agrivoltaico implica tomar decisiones geométricas y constructivas que tienen consecuencias simultáneas sobre la producción agrícola, la generación energética y la viabilidad operativa del sistema. A diferencia de una instalación fotovoltaica convencional, donde los parámetros de diseño se optimizan exclusivamente para maximizar la captación solar, en agrivoltaica cada decisión de diseño afecta a dos sistemas productivos interdependientes y con requerimientos a veces contrapuestos.

5.3.1.1. Criterio de diseño geométrico

Los parámetros geométricos del sistema, descritos en términos tipológicos en el apartado 5.1.2 adquieren aquí una dimensión de decisión de proyecto: no se trata de saber qué rangos de altura o separación existen, sino de entender qué criterios deben guiar su elección en función del cultivo, la maquinaria y los objetivos productivos del emplazamiento concreto.

La **altura mínima operativa** determina la compatibilidad del sistema con la mecanización agrícola. La altura libre bajo los módulos debe ser suficiente para permitir el paso de la maquinaria habitual en la explotación. En la práctica, esto implica estructuras de al menos 4 metros de altura libre en sistemas destinados a agricultura extensiva mecanizada, mientras que en cultivos hortícolas o frutales de menor porte pueden ser suficientes alturas de entre 2 y 3 metros [7]. Una altura insuficiente no solo impide la mecanización, sino que también reduce la ventilación bajo los paneles y concentra la sombra en bandas más estrechas, con efectos negativos sobre la uniformidad de la iluminación del cultivo.

La **distancia entre hileras o *pitch*** determina conjuntamente la densidad de potencia instalada por hectárea y el porcentaje de radiación que llega al suelo. Una separación mayor entre filas incrementa la radiación disponible para el cultivo y facilita las labores agrícolas, pero reduce la potencia instalada por unidad de superficie y por tanto los ingresos energéticos del sistema. Una separación menor maximiza la generación eléctrica, pero puede comprometer el rendimiento agrícola, especialmente en cultivos con altos requerimientos lumínicos. Estudios sobre cultivos de avena y patata han indicado reducciones de rendimiento de hasta un 50 % cuando la separación entre filas de paneles era inferior a 5 metros, lo que establece un umbral de referencia práctico para cultivos extensivos [7].

La **optimización del sombreado** en función del cultivo implica ajustar conjuntamente la densidad de módulos, su inclinación y la separación entre filas para conseguir que el nivel de radiación transmitida al cultivo se sitúe dentro del rango de tolerancia de la especie seleccionada. Las

configuraciones habituales transmiten entre el 50 y el 70 % de la radiación al cultivo, pero este rango debe ajustarse a las necesidades lumínicas específicas de cada especie: los cultivos C3 tolerantes a la sombra admiten coberturas más densas, mientras que los cultivos C4 con alto punto de saturación lumínica requieren configuraciones más abiertas. La orientación de los módulos también influye sobre la uniformidad de la distribución de luz: los sistemas inclinados norte-sur generan bandas de sombra y luz alternadas, mientras que los módulos verticales bifaciales orientados este-oeste producen una sombra más homogénea a lo largo del día [7].

5.3.1.2. Indicadores de eficiencia del uso de la tierra

La relación de equivalencia de tierra (LER, del inglés *Land Equivalent Ratio*), es el indicador más utilizado para evaluar la eficiencia global de los sistemas agrivoltaicos frente a los usos convencionales del suelo. Su valor expresa en qué medida la coproducción simultánea de energía y alimento en una misma superficie supera a la producción por separado de ambos en parcelas independientes. Un valor de LER superior a 1 indica que el sistema agrivoltaico hace un uso más eficiente del suelo que los sistemas de uso único, mientras que valores iguales o inferiores a 1 señalarían que no existe ventaja en la integración [7].

Para su cálculo se tienen en cuenta dos componentes: el rendimiento agrícola conseguido bajo los paneles en relación con el obtenido en condiciones de cultivo convencional, y la energía generada por el sistema agrivoltaico en comparación con la producida por una instalación fotovoltaica convencional tomada como referencia. La suma de ambas proporciones da como resultado el valor del LER [7]:

$$LER = \frac{Y_{agri-APV}}{Y_{agri}} + \frac{Y_{APV}}{Y_{PV}}$$

Donde Y_{agri} representa la producción agrícola obtenida en un sistema de uso único del suelo, $Y_{agri-APV}$ corresponde al rendimiento agrícola alcanzado bajo un sistema agrivoltaico para la misma superficie, Y_{PV} hace referencia a la energía generada por una instalación fotovoltaica convencional de referencia, e Y_{APV} designa la energía producida del sistema agrivoltaico [17].

Los resultados reportados en la literatura muestran de forma consistente que los sistemas agrivoltaicos alcanzan valores de LER superiores a la unidad. Distintos estudios recogen valores que oscilan entre 1,29 y 1,73 [4] lo que equivale a incrementos en el aprovechamiento del suelo de hasta un 73 % respecto a los sistemas convencionales. Otras investigaciones sitúan el umbral habitual entre 1,2 y 1,5, considerándose valores dentro de este rango como indicativos de una integración exitosa [7]. En casos donde las condiciones hídricas son limitantes, el rendimiento agrícola bajo el sistema agrivoltaico puede superar al obtenido en campo abierto, llevando el LER a valores superiores a 2 e incluso próximos a 3, como se ha documentado en cultivos de maíz bajo escenarios de estrés hídrico [15]. El valor máximo registrado en la literatura alcanza 2,9, con mejoras en la productividad y eficiencia del suelo de hasta un 90% y un 186% respectivamente [10].

A pesar de su amplia utilización, el LER presenta limitaciones como indicador único de evaluación. Al centrarse exclusivamente en la producción agrícola y energética, deja fuera dimensiones igualmente relevantes para la toma de decisiones como el impacto sobre la disponibilidad de agua, la salud del suelo, la creación de puestos de trabajo o la contribución a la mitigación del cambio climático. Esto justifica su uso complementario con los indicadores descritos en los apartados siguientes [10].

En estrecha relación con el LER, la relación de sombreado (SR) cuantifica la proporción de superficie agrícola afectada por la sombra de los módulos fotovoltaicos. Este parámetro resulta

determinante para estimar el impacto sobre la producción agrícola, ya que una reducción excesiva de la radiación disponible puede comprometer el rendimiento del cultivo. Su cálculo requiere considerar tanto la geometría del módulo como su impacto lumínico sobre el suelo, incluyendo el ángulo de inclinación, la proyección de sombra resultante y la superficie total del módulo, y no únicamente el área sombreada en un instante dado. Los valores de SR considerados aceptables se sitúan entre el 20 % y el 40 %, aunque el umbral óptimo varía en función de las necesidades lumínicas de cada especie y de las condiciones climáticas locales [7].

Para superar las limitaciones que presenta el uso de indicadores de forma aislada, herramientas como el análisis de ciclo de vida (ACV) y los marcos de evaluación multicriterio incorporan conjuntos más amplios de indicadores. El ACV evalúa aspectos como el consumo energético, las emisiones o el uso de recursos a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema, proporcionando una visión global de su sostenibilidad ambiental [16] . Por su parte, los marcos multicriterio integran indicadores técnicos, ambientales, económicos y sociales, combinando métricas como el LER o la SR con otras relacionadas con la rentabilidad, el uso del agua o el impacto social. Este enfoque permite evaluar los sistemas agrivoltaicos como infraestructuras multifuncionales y captar su valor de forma más compleja [10].

5.3.2. Factores económicos

La viabilidad económica de un sistema agrivoltaico es estructuralmente diferente a la de una instalación fotovoltaica convencional. Mientras que esta última optimiza un único flujo de ingresos, la venta de electricidad, frente a una estructura de costes relativamente simple, la agrivoltaica gestiona simultáneamente dos actividades productivas con sus propios costes, ingresos y riesgos. Esta dualidad es al mismo tiempo su principal ventaja competitiva, la diversificación de ingresos y la reducción de la competencia por el suelo, y su principal complejidad analítica, ya que la rentabilidad del sistema depende de la interacción entre parámetros energéticos, agronómicos, regulatorios y de mercado que varían según el emplazamiento [11].

La expansión de la energía solar fotovoltaica ha estado acompañada de una reducción sostenida de sus costes a lo largo de la última década. Entre 2010 y 2019, el coste total de instalación de los sistemas fotovoltaicos cayó un 74 % a nivel global, impulsado principalmente por el abaratamiento de los módulos, que redujeron su precio más de un 90 % en ese período. El LCOE de electricidad fotovoltaica a escala de servicios públicos disminuyó un 77 % entre 2010 y 2018, situándose en torno a 0,085 USD/kWh, con proyecciones que apuntan a valores de entre 0,02 y 0,08 USD/kWh para 2030 [16]. Es en este contexto de fotovoltaica madura y de bajo coste donde debe situarse el análisis económico de la agrivoltaica, que incorpora una complejidad adicional derivada de su doble función energética y agrícola y una estructura de costes más elevada [11].

5.3.2.1. Costes de inversión (CAPEX)

Los costes de inversión de los sistemas agrivoltaicos son sistemáticamente superiores a los de las instalaciones fotovoltaicas convencionales en suelo, siendo esta la principal barrera económica para su despliegue a gran escala. Esta diferencia se explica fundamentalmente por tres factores: el tipo de módulo requerido, la complejidad de las estructuras de soporte y los costes de preparación e instalación del emplazamiento [8].

En cuanto a los módulos, el uso de configuraciones bifaciales de vidrio-vidrio, frecuentemente necesarias en sistemas agrivoltaicos para garantizar la transmisión de luz al cultivo, incrementa el coste respecto a los módulos monofaciales estándar, aunque este sobrecoste suele compensarse parcialmente con una mayor generación de energía por unidad de potencia instalada [8]. Respecto a las estructuras de soporte, los sistemas agrivoltaicos sobre agricultura de cultivo presentan

costes de montaje significativamente más elevados que la fotovoltaica convencional, con valores que oscilan en función del espacio vertical y horizontal requerido y de los condicionantes estáticos locales como viento o nieve. Para cultivos permanentes[9], estos costes tienden a ser menores que en agricultura extensiva. Los costes de preparación e instalación del emplazamiento también son mucho más altos en agrivoltaica, derivados de medidas de protección del suelo, y de la mayor complejidad logística que implica trabajar en terrenos en producción agrícola [8].

La estructura de costes de inversión puede expresarse formalmente como:

$$CAPEX = C_{PV} + C_i + C_M + C_B + C_{BOS} + C_G$$

- C_{PV} = Costes de los módulos fotovoltaicos [€/kWp]
- C_i =Costes de los inversores [€/kWp]
- C_M = Costes de montaje de estructuras [€/kWp]
- C_B = Costes de montaje [€/kWp]
- C_{BOS} = Costes de otros equipos como cable, control remoto, evaluaciones medioambientales, asistencia legal [€/kWp]
- C_G = Coste de la conexión a la red [€/kWp]. Se formula de la siguiente manera:

$$C_G = C_{ST} + \frac{C_C * d}{c}$$

- C_{ST} = Costes para transformador y subestación [€/kWp]
- C_C = Costes del cable al punto de conexión a la red [€/km]
- d = Distancia al punto de conexión a la red [km]
- c = Capacidad instalada por hectárea [kWp/ha]

A efectos comparativos, el CAPEX anualizado por hectárea se obtiene como:

$$CAPEX_{aa} = CAPEX * c * af$$

- $CAPEX$ = Requisitos de inversión incluyendo la conexión a la red [€/kWp]
- af = Factor de anualidad

El National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos (NREL) estima para un sistema de referencia de 500 kWp un rango de CAPEX de 1,53 USD/Wp para fotovoltaica convencional y de hasta 2,33 USD/Wp para sistemas agrivoltaicos sobre agricultura extensiva, lo que representa un incremento máximo de alrededor del 52 %. En Alemania, estudios recientes sitúan el sobrecoste de inversión entre el 30 y 50 % respecto a la fotovoltaica, con costes que oscilan entre 700 y 1.220 €/kW instalado según el tipo de sistema [8].

Existen sin embargo elementos que pueden hacer variar parcialmente el CAPEX tal y como se muestra en la Ilustración 22. La eliminación del cercado perimetral, que en fotovoltaica convencional representa un componente de coste relevante y que en los sistemas agrivoltaicos integrados en explotaciones agrícolas activas frecuentemente no es necesario; y la sustitución, en el caso de cultivos permanentes, de infraestructuras preexistentes como las redes antigranizo, lo que reduce el coste neto de la instalación. En todos los casos, los costes de inversión presentan economías de escala relevantes, aunque más difíciles de alcanzar en agrivoltaica que en

[9] Cultivos permanentes (o perennes): son aquellos que no requieren ser replantados después de cada cosecha. Ocupan la tierra durante un periodo prolongado (5 años o más) y producen cosechas repetidas. Ejemplos: árboles frutales (cítricos, manzanos, aguacates y olivos), plantaciones industriales (café, cacao, caucho) y viñedos y arbustos (uvas de mesa, arándanos y frambuesas).

fotovoltaica convencional, dado el mayor grado de adaptación específica que requieren los diseños al tipo de cultivo y a las condiciones del emplazamiento [8].

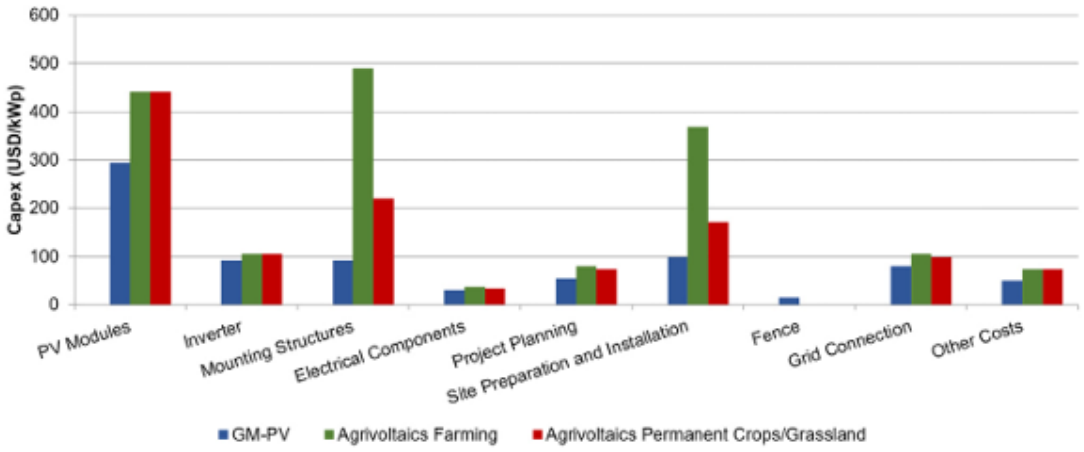


Ilustración 22. Comparación CAPEX entre aplicaciones fotovoltaicas montadas en tierra y dos aplicaciones diferentes de agrivoltaica aérea [8]

5.3.2.2. Costes de operación (OPEX)

A diferencia del CAPEX, los costes operativos de los sistemas agrivoltaicos presentan un perfil mixto respecto a la fotovoltaica convencional: algunos componentes son más elevados y otros pueden ser inferiores, dependiendo del tipo de sistema y del modelo de gestión adoptado.

Entre los factores que pueden reducir el OPEX destaca la eliminación de los costes de control de vegetación bajo los paneles, ya que la propia actividad agrícola se encarga de esta función. El coste de la tierra tiende a ser menor al distribuirse entre el uso energético y el agrícola. En sistemas instalados sobre praderas o pastos, el pastoreo de animales puede sustituir al mantenimiento mecánico de la cubierta vegetal. Por el contrario, algunos componentes son más elevados en agrivoltaica: la necesidad de maniobrar con maquinaria agrícola alrededor de la infraestructura, los costes de limpieza y mantenimiento de los módulos en sistemas elevados, los servicios de reparación de la estructura y, en cultivos permanentes, la gestión continuada del cultivo para adaptarlo favorablemente a las condiciones de luz modificadas por los paneles.

El coste operativo se expresa como:

$$OPEX = a_{OM} + a_R + a_G + a_C + a_i + a_M + \frac{oc}{c}$$

- a_{OM} = Operación y mantenimiento promedio [€/kWp/año]
- a_R = Reservas de reparación para inversores [€/kWp/año]
- a_G = Cuidado de pastizales y matorrales [€/kWp/año]
- a_C = Costes medios de limpieza anuales [€/kWp/año]
- a_i = Costes de los seguros [€/kWp/año]
- a_M =Gestión comercial, marketing directo/trading y costes de monitorización remota [€/kWp/año]
- oc = Costes de oportunidad para el uso del suelo = la pérdida de retorno a la tierra para para usos agrícolas [€/ha/año]
- c = Capacidad instalada por hectárea [kWp/ha]

Y el coste operativo por área:

$$OPEX_{area} = OPEX * c$$

En términos globales, los gastos de operación y mantenimiento por unidad de potencia instalada disminuyen a medida que aumenta el tamaño del sistema, siguiendo una pauta de economías de escala similar a la del CAPEX, aunque con menor intensidad [11].

5.3.2.3. Flujos de doble ingreso y rentabilidad

Los sistemas agrivoltaicos pueden generar ingresos procedentes de tres fuentes principales: la venta de electricidad a la red o mediante autoconsumos, los ingresos derivados de la producción agrícola y, en algunos modelos de negocio, los ahorros en costes operativos respecto a la gestión convencional del terreno [4].

El **coste de generación eléctrica** en sistemas agrivoltaicos suele situarse por encima del registrado en instalaciones fotovoltaicas convencionales, con diferencias de entre el 4 % y el 148 % según el tipo de instalación. Las configuraciones con seguimiento solar o con estructuras de menor altura tienden a mostrar sobrecostes más reducidos [11]. La aportación económica de la actividad agrícola suele ser limitada y apenas modifica la rentabilidad total del proyecto de forma aislada: en la mayoría de los casos estudiados, los ingresos derivados de los cultivos solo permiten disminuir el coste nivelado de la electricidad entre un 1,5 % y un 4,6 %. Sin embargo, cuando la agrivoltaica se combina con cultivos de alto valor añadido, los incrementos de rentabilidad pueden ser significativos [11]: la venta combinada de electricidad con albahaca y espinaca incrementó los valores de producción entre un 18 % y un 113 % respectivamente, y la posibilidad de generar electricidad para autoconsumo permite a los agricultores reducir sus costes energéticos asociados al riego, la refrigeración y el procesamiento de productos [4]. La coproducción redujo el periodo de recuperación de la inversión entre un 30 % y un 35 % respecto a sistemas de solo generación eléctrica [4].

Como se puede ver en la Ilustración 23, los sistemas agrivoltaicos sobre agricultura extensiva pueden beneficiarse de economías de escala asociadas a instalaciones de mayor tamaño, lo que podría traducirse en una ventaja de costes frente a las aplicaciones hortícolas, donde el mayor grado de adaptación específica limita este efecto [8].

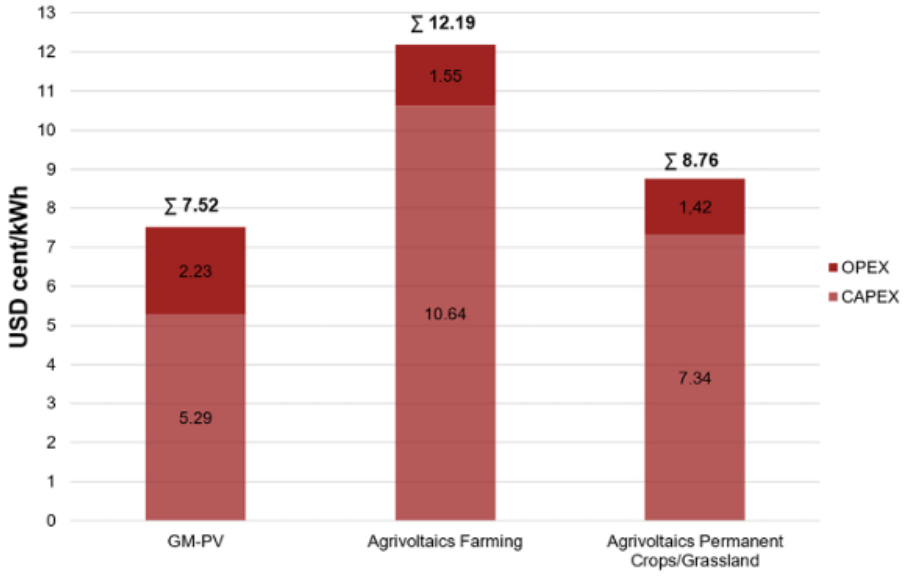


Ilustración 23. Comparación de CAPEX y OPEX en sistemas GM-PV y Agrivoltaicos [8]

5.3.2.4. Retorno de la inversión y análisis de viabilidad financiera

El periodo medio de recuperación de la inversión[10] se sitúa entre cinco y ocho años según los estudios disponibles, aunque varía considerablemente en función del tipo de cultivo, la escala del sistema, el marco de incentivos y las condiciones climáticas del emplazamiento [4].

Para evaluar el coste efectivo de conservar suelo agrícola mediante sistemas agrivoltaicos frente a la alternativa de instalar fotovoltaica convencional, resulta especialmente útil el indicador conocido como precio anual de preservación, que cuantifica el gasto anual necesario para mantener en uso agrícola una hectárea que, de no existir la instalación agrivoltaica, habría sido ocupada íntegramente por paneles solares. Los análisis disponibles muestran que, en configuraciones de baja altura y tamaño medio, este coste se sitúa aproximadamente entre 8.000 y 26.000 €/ha al año, mientras que en sistemas elevados o aplicados a huertos frutales alcanza entre 42.000 y 75.000 €/ha anuales, cifras que superan con holgura los beneficios netos que la actividad agrícola puede generar en esas mismas superficies [11].

Las tasas internas de retorno[11] favorables, de hasta el 25 %, y los valores presentes netos positivos, como los 70 millones de euros documentados en proyectos de 38 MW sobre huertos de manzano [6], demuestran que la agrivoltaica puede ofrecer retornos financieros atractivos en condiciones adecuadas [10]. Sin embargo, los autores advierten que, bajo condiciones estándar y sin incentivos suficientes, mantener separados los usos agrícola y fotovoltaico puede resultar económicamente más ventajoso que el uso dual del espacio. En consecuencia, la agrivoltaica se justifica económicamente con mayor solidez en emplazamientos con cultivos de alto valor añadido, en proyectos de escala media o grande, y en contextos donde los marcos de incentivos están bien diseñados para compensar los sobrecostes estructurales [11].

5.3.3. Factores sociales y aceptación social

La viabilidad de los proyectos agrivoltaicos no depende únicamente de su rendimiento técnico o económico, sino en gran medida de su capacidad para ganarse el respaldo de las comunidades donde se implementan. La dimensión social constituye un factor de viabilidad tan determinante como el CAPEX o el LER, y su descuido en las fases tempranas del proyecto puede bloquear desarrollos técnicamente sólidos y económicamente rentables [13].

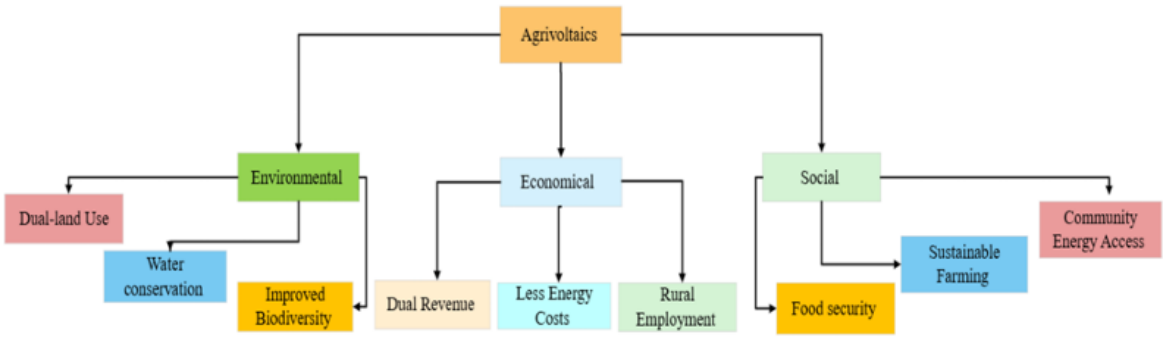


Ilustración 24. Impactos ambientales, económicos y sociales de la agrivoltaica. [6]

[10] El periodo de recuperación de la inversión (*Payback Period*) es el tiempo necesario para que los ingresos o ahorros generados por un proyecto igualen la inversión inicial realizada.
[11] La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador financiero que expresa la rentabilidad esperada de una inversión en términos porcentuales anuales.

5.3.3.1. Aceptación social y de agricultores

Un estudio basado en entrevistas a profesionales del sector solar en Estados Unidos identifica tres dimensiones interrelacionadas que condicionan la aceptación de los proyectos agrivoltaicos: la dimensión de mercado, la comunitaria y la sociopolítica que se resumen a continuación [18]:

- Desde el punto de vista del **mercado**, los proyectos agrivoltaicos se perciben como más complejos y costosos de desarrollar que las instalaciones fotovoltaicas convencionales, ya que requieren una coordinación adicional con agricultores, una adaptación del diseño a las necesidades de la actividad agrícola y una mayor gestión de riesgos y responsabilidades legales. Sin embargo, los profesionales entrevistados señalan que esta complejidad puede compensarse con ventajas no económicas: una mejor imagen corporativa, una mayor facilidad en los procesos de autorización y una posibilidad de reducir costes operativos.
- La **dimensión comunitaria** emerge como la más determinante para el éxito de un desarrollo agrivoltaico. Cuando los proyectos se diseñan respetando y potenciando los intereses agrícolas de la comunidad, la resistencia local tiende a reducirse considerablemente. Los profesionales consultados subrayan que la participación activa de los agricultores y otros actores locales desde las fases iniciales del proyecto no solo mejora la aceptación, sino que puede resultar decisiva para su viabilidad.
- En cuanto a la **dimensión sociopolítica**, el entorno regulatorio local constituye tanto una barrera como una oportunidad. En varios estados de Estados Unidos, las ordenanzas locales de zonificación han llegado a impedir el desarrollo de instalaciones fotovoltaicas en suelo agrícola como respuesta a la oposición ciudadana acumulada. Sin embargo, la agrivoltaica puede convertirse en un catalizador para revisar estas normativas, precisamente porque su doble función energética y agrícola la dota de una legitimidad diferente ante las comunidades rurales.

Otro estudio desarrollado en Arizona mediante un taller participativo con agricultores, representantes de comunidades indígenas, responsables gubernamentales y organizaciones locales ilustra cómo la escala, la estructura de propiedad y los beneficios esperados para la comunidad anfitriona condicionan de forma determinante el apoyo o el rechazo a los proyectos. La mayoría de los participantes manifestó una preferencia por instalaciones de tamaño reducido, la opción de propiedad, más valorada fue la de los modelos compartidos entre agricultor, empresa energética y comunidad, y los proyectos óptimos se asociaron con la producción local de alimentos, el ahorro de agua y la creación de oportunidades educativas [19].

La literatura reciente señala además que la falta de conocimiento y los malentendidos sobre la tecnología constituyen una de las principales razones de oposición, junto con la incertidumbre sobre el rendimiento de los cultivos y la ambigüedad en torno a los marcos regulatorios. Por ello, se subraya la necesidad de impulsar la investigación en abierto, la comunicación clara y la planificación participativa [10]. Un estudio realizado en la Región de Murcia sobre la percepción en viñedos reveló que el 94 % de los encuestados mostraron una actitud favorable hacia la integración de paneles solares en estructuras agrícolas existentes, condicionada a que el diseño fuera compatible con el paisaje vinícola tradicional. Los beneficios más valorados fueron el aumento de la productividad económica de la tierra, y la contribución al desarrollo socioeconómico regional, mientras que los principales inconvenientes señalados fueron los mayores costes iniciales de instalación y la incertidumbre sobre la producción de uva [17].

Entre los factores que condicionan la aceptación local, la literatura identifica diez criterios clave: priorizar el uso de cubiertas y aparcamientos existentes antes de ocupar suelo agrícola; integrar los sistemas en el suministro energético descentralizado; combinarlos con almacenamiento de

energía; garantizar que la actividad agrícola sea real y no meramente simbólica; buscar sinergias específicas del lugar; limitar el tamaño y establecer distancias mínimas a zonas residenciales; evitar impactos negativos sobre el ocio, el turismo y el paisaje; someter las aprobaciones a normativas estrictas con participación ciudadana; favorecer la propiedad local por parte de agricultores o cooperativas; y destinar las franjas no cultivables a la protección de la biodiversidad [8].

5.3.3.2. Afectación del paisaje

El impacto visual de los sistemas agrivoltaicos sobre el paisaje agrícola constituye uno de los aspectos más debatidos en la literatura social sobre esta tecnología. En términos generales, los sistemas agrivoltaicos se perciben como menos invasivos visualmente que otras infraestructuras de energía renovable como los parques eólicos o las plantas fotovoltaicas convencionales en suelo. No obstante, su implantación transforma inevitablemente la imagen del territorio, lo que puede generar conflictos cuando el paisaje agrícola tiene un peso significativo en la identidad cultural local o en la economía turística [13].

La percepción del impacto paisajístico no es homogénea. Los residentes urbanos tienden a idealizar el paisaje rural como un espacio de naturales y descanso, oponiéndose con mayor frecuencia a las transformaciones que alteran su estética tradicional. Los agricultores y residentes rurales, en cambio, suelen percibir ese mismo paisaje como un espacio productivo, mostrándose más receptivos a los cambios cuando estos se asocian a mejoras económicas tangibles. Esta brecha entre perspectivas urbanas y rurales puede convertirse en una fuente de conflicto si no se gestiona adecuadamente durante el proceso de planificación [13]. Los sistemas de baja altura permiten una mejor integración en el entorno y generan menor oposición, mientras que las estructuras elevadas pueden provocar transformaciones más duraderas en el paisaje [17]. En este sentido, se recomienda priorizar emplazamientos poco visibles desde zonas residenciales o turísticas [8], integrar vegetación como setos o arbolado que amortigüe la presencia de los paneles, y establecer mecanismos de compensación económica para los municipio y comunidades afectadas. Estos elementos no solo reducen la percepción de degradación del paisaje, sino que pueden contribuir a mejorar la biodiversidad local [13].

5.3.3.3. Justicia energética y equidad social

La expansión de los sistemas agrivoltaicos plantea importantes interrogantes sobre cómo se distribuyen sus beneficios y costes entre los distintos actores implicados, analizados a través de un marco de justicia energética y ambiental que abarca cuatro dimensiones: distribución de beneficios y costes, participación en la toma de decisiones, reconocimiento de grupos vulnerables y compensación restaurativa [13].

- Desde el punto de vista de la **distribución de beneficios**, los sistemas agrivoltaicos generan ingresos adicionales para los agricultores y pueden contribuir al desarrollo rural. Sin embargo, estos beneficios no se reparten de forma equitativa: los grandes propietarios agrícolas y los inversores tienden a obtener ventajas desproporcionadas, mientras que los pequeños agricultores, los arrendatarios y las comunidades locales quedan frecuentemente al margen. Los expertos coinciden en que los proyectos deberían priorizar el suministro de energía asequible para las comunidades locales y garantizar una distribución más equitativa de los retornos.
- Respecto a la **participación en la toma de decisiones**, las decisiones sobre estos proyectos tienden a desarrollarse en espacios poco accesibles para el público en general, con una presencia dominantes de organizaciones agrarias, grandes inversores y administraciones, mientras que agricultores jóvenes, pequeños productores, residentes locales permanecen en gran medida al margen. Entre los mecanismos propuestos destacan

las comunidades energéticas locales, las campañas informativas, los talleres de codiseño y los proyectos piloto.

- En cuanto al **reconocimiento de grupos vulnerables**, el análisis revela una marcada asimetría: los actores con mayor poder económico, político o territorial tienden a ver sus intereses reconocidos, mientras que pequeños agricultores, arrendatarios, y personas en situación de pobreza energética permanecen sistemáticamente al margen. El estudio señala además que la justicia del reconocimiento no debería limitarse a los seres humanos, incluyendo también ecosistemas y biodiversidad.
- Finalmente, en materia de **compensación y justicia restaurativa**, los marcos regulatorios deberían integrar desde la fase de planificación medidas compensatorias obligatorias como zonas de restauración de biodiversidad o financiación de iniciativas comunitarias, considerando además la dimensión intergeneracional de esta responsabilidad para que los costes a largo plazo no recaigan sobre quienes no han participado en las decisiones ni se han beneficiado de sus resultados.

5.3.4. Factores regulatorios y políticas públicas

El marco normativo constituye uno de los condicionantes más determinantes para el despliegue de la agrivoltaica a gran escala. A diferencia de otros factores de viabilidad, el marco regulatorio no solo condiciona la rentabilidad del proyecto mediante incentivos y tarifas, sino que define qué es legalmente un sistema agrivoltaico, qué obligaciones debe cumplir y a qué instrumentos de apoyo puede acceder [19].

5.3.4.1. Vacío normativo y zona gris regulatoria

A nivel europeo, no existe actualmente ninguna directiva ni reglamento específico dedicado a la agrivoltaica. Los principales instrumentos aplicables son la Política Agrícola Común y la Directiva de Energías Renovables. Ninguno de los países europeos analizados ha establecido una clasificación de uso del suelo específica para la agrivoltaica dentro de sus marcos de ordenación territorial, lo que genera una zona gris normativa: sin una categoría jurídica propia, los sistemas agrivoltaicos quedan atrapados entre la normativa energética, que los trata como instalaciones fotovoltaicas convencionales, y la normativa agrícola, que no los reconoce como práctica agraria. Esta doble exclusión impide que los agricultores accedan a formación, seguros de cosecha, subvenciones y asesoramiento técnico en condiciones equiparables a las de la agricultura convencional, y desincentiva la inversión en proyectos cuya elegibilidad para los incentivos disponibles resulta incierta [20].

Una limitación común a todos los países analizados es la ausencia de regulación específica sobre bioseguridad durante el desarrollo y operación de proyectos agrivoltaicos, la falta de instrumentos financieros de gestión de riesgos adaptados a la naturaleza híbrida de estos sistemas, y la ausencia de integración formal en mercados de créditos de carbono o en sistemas de energías renovables certificadas [20].

5.3.4.2. Marcos normativos y estándares técnicos nacionales: Alemania, Francia e Italia

Los países europeos con mayor desarrollo normativo específico para la agrivoltaica son Alemania, Francia e Italia, cada uno con un enfoque diferenciado que refleja sus prioridades de política y energética.

Alemania reconoció la agrivoltaica en 2024 como sistema solar especial, otorgándole un régimen de autorización privilegiada. La normativa técnica DIN DPEC 91434 establece los requisitos estructurales de los sistemas y fija en el 90 % la superficie agrícola mínima que debe mantenerse en producción en sistemas elevados. Para acceder al bono de la Ley de Energías Renovables

(EEG), los sistemas deben superar una altura mínima de 2,1 metros y los promotores están obligados a presentar un plan de cultivo y monitorizar el rendimiento agrícola durante tres años. Se otorga una prima adicional de 1,2 céntimos por kWh a los sistemas que cumplen los requisitos técnicos de altura y preservación agrícola. Es además el único país que cuenta con disposiciones específicas para facilitar la integración de sistemas agrivoltaicos a pequeña escala [20].

Francia exige que los proyectos agrivoltaicos mantengan al menos el 90 % del rendimiento agrícola de referencia, con evaluaciones anuales obligatorias cuyo incumplimiento conlleva la pérdida del estatus agrivoltaico. La normativa francesa requiere que el diseño técnico aporte beneficios agronómicos demostrables. Es el único país analizado que exige expresamente la participación activa de los agricultores en el codiseño y la presencia de un agricultor activo como condición de elegibilidad, lo que le otorga la puntuación más alta en justicia social dentro del análisis comparado. El apoyo económico se articula a través de subvenciones del primer pilar de la Política Agrícola Común y de licitaciones específicas al amparo de la ley APER [20].

Italia establece un límite máximo de cobertura del 40 % de la parcela agrícola, lo que puede limitar la escalabilidad en comparación con los sistemas más orientados a resultados de Alemania y Francia. Los proyectos deben acreditar valor añadido a la productividad agrícola como condición de elegibilidad, y se requieren informes agronómicos elaborados por profesionales cualificados [20].

En lo que respecta al desarrollo normativo y adopción de estándares técnicos los criterios marcados por la norma DIN SPEC 91434, se han convertido en referencia para otros países. Esta norma representa uno de los primeros intentos a escala europea de establecer parámetros objetivos y verificables para caracterizar y certificar los sistemas agrivoltaicos, contribuyendo así a dotar al sector de un lenguaje técnico común [8].

Un análisis más detallado de este marco normativo fue desarrollado por el instituto Fraunhofer ISE en sus directrices específicas sobre agrivoltaica, el cual ha servido de referencia para otros países europeos que están desarrollando sus propios marcos normativos, aunque la ausencia de un estándar armonizado a nivel europeo sigue siendo una de las brechas más relevantes para la comparabilidad entre proyectos y la transferencia de conocimiento entre jurisdicciones [8].

5.3.4.3. Análisis comparado y diferencias entre países

El análisis comparado mediante un modelo multicriterio revela diferencias significativas en el grado de alineación de los marcos regulatorios con los objetivos de una transición agrivoltaica justa y escalable. Francia obtiene la puntuación global más alta por su liderazgo en justicia social. Alemania destaca en productividad agrícola e instrumentos económicos. Italia presenta un perfil equilibrado, aunque su límite de cobertura del 40 % puede frenar el desarrollo a mayor escala. Una tendencia observable en todos los países es que los proyectos que acceden a incentivos públicos mediante subastas o tarifas de inyección están sujetos a mayores exigencias de justicia social, lo que sugiere que los instrumentos de financiación pública pueden actuar como palancas eficaces para incorporar criterios de equidad y sostenibilidad en el diseño de los proyectos. Respecto al acceso de pequeños productores, solo Alemania cuenta con disposiciones específicas para facilitar su integración, lo que puede perpetuar las desventajas de quienes no disponen de capital suficiente en Francia e Italia [20].

5.3.4.4. Recomendaciones de reforma regulatoria

La literatura identifica cuatro líneas de reforma prioritarias. En primer lugar, la agrivoltaica debería quedar **formalmente integrada en los programas de incentivos agrícolas**, los esquemas de desarrollo rural y los marcos de extensión agraria [20]. En segundo lugar, es necesario **desarrollar instrumentos financieros específicamente adaptados** a la naturaleza dual, como

tarifas de inyección diferenciadas, líneas de crédito concesionales o garantías financieras. En tercer lugar, la regulación debería **incorporar disposiciones específicas sobre bioseguridad** durante las fases de diseño, operación y desmantelamiento, así como orientaciones claras sobre los acuerdos legales entre promotores y agricultores. Finalmente, los **marcos de monitorización deberían reforzarse** para incorporar evaluaciones de la productividad agrícola en todas las fases del ciclo de vida del proyecto, desde la precomisión hasta el desmantelamiento, con una gobernanza interministerial que coordine los departamentos de agricultura, energía y medio ambiente [20].

6. Estudio de caso

6.1. Justificación del estudio

6.1.1. Brechas de conocimiento

A pesar del creciente interés académico en los sistemas agrivoltaicos (Ilustración 25, Ilustración 26), la literatura especializada evidencia un conjunto de limitaciones que condicionan tanto el avance del conocimiento como la transferencia tecnológica a escala.

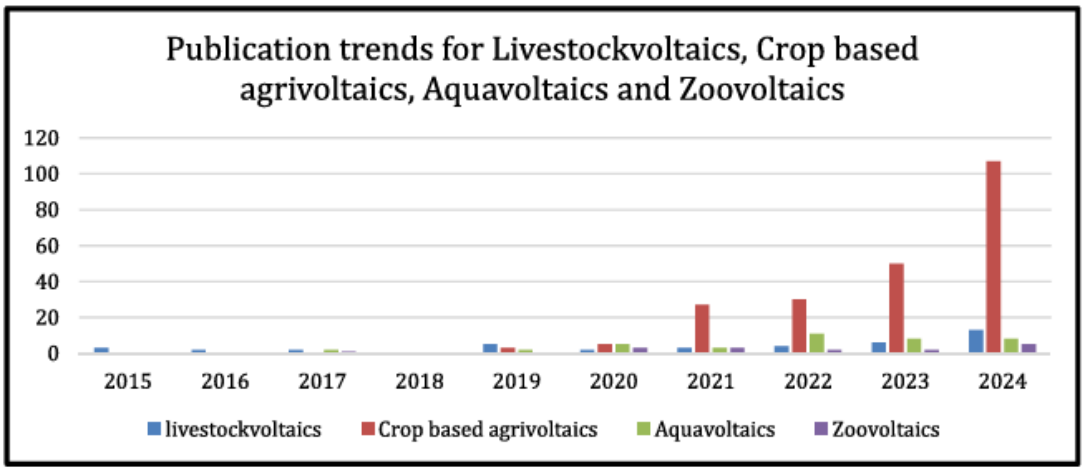


Ilustración 25. Tendencias en publicaciones basadas en Scopus para diversos sistemas agrícolas [12]

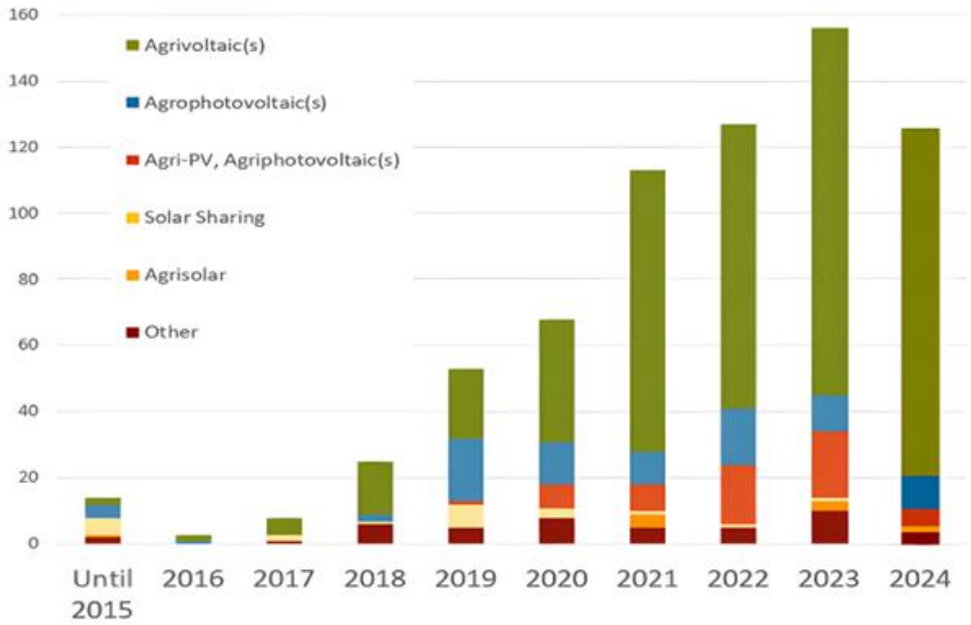


Ilustración 26. Crecimiento de las publicaciones agrícolas [20]

Estas brechas no son aisladas, sino que se refuerzan mutuamente: la escasez empírica sólida dificulta la construcción de marcos normativos, y la fragmentación regulatoria desincentiva a su vez la realización de estudios comparables entre regiones. A continuación, se identifican tres dimensiones críticas que justifican la necesidad del presente trabajo.

6.1.1.1. Falta de datos experimentales

Una de las carencias más señaladas en la bibliografía reciente es la escasa disponibilidad de datos primarios generados en condiciones reales de operación. Modalidades emergentes como los sistemas ganaderos integrados con paneles solares o las combinaciones de fruticultura y generación fotovoltaica se encuentran aún en fase predominantemente conceptual, y los estudios que abordan sus efectos concretos son todavía escasos [12]. Los valores que maneja la literatura provienen mayoritariamente de extrapolaciones a partir de casos estudiados particulares, cuya representatividad es limitada frente a la diversidad de condiciones climáticas, edáficas y de gestión que caracterizan los entornos agrícolas reales. A esto se suma la ausencia de mecanismos de monitoreo continuo a largo plazo que permitan contrastar los beneficios reportados con mediciones sistemáticas en campo. Sin datos experimentales robustos y reproducibles, resulta difícil establecer relaciones causales fiables o formular recomendaciones técnicas generalizables que puedan trasladarse con garantías a nuevos emplazamientos [10].

6.1.1.2. Falta de estandarización

La heterogeneidad en los criterios de diseño, evaluación y reconocimiento institucional de los sistemas agrivoltaicos constituye otro obstáculo de primer orden. Solo un reducido número de países ha avanzado en el desarrollo de marcos normativos específicos para esta tecnología; la mayoría de las jurisdicciones carece aún de instrumentos que la reconozcan formalmente como uso dual del suelo, lo que frena su difusión al no existir orientaciones de política claras, estructuras de incentivos ni estándares de certificación consolidados. Esta falta de estandarización opera en dos niveles simultáneos: a nivel técnico, hace que los estudios existentes sean difícilmente comparables entre sí; a nivel institucional, impide que los beneficios adicionales de estos sistemas se traduzcan en instrumentos financieros o fiscales que mejoren su competitividad [10]. Paralelamente, la viabilidad económica de estos proyectos depende en gran medida de la existencia de subvenciones y apoyos regulatorios que compensen los mayores costes de instalación respecto a infraestructuras fotovoltaicas convencionales [6]. La falta de marcos normativos claros genera además incertidumbre jurídica que puede desincentivar la inversión privada [19].

6.1.1.3. Limitaciones en estudios regionales

La distribución geográfica de la investigación sobre agrivoltaica es marcadamente desigual. Las aplicaciones documentadas se concentran en un número limitado de países, principalmente en Europa central y determinadas regiones de Asia y América del Norte, lo que introduce sesgos en las conclusiones disponibles y restringe su aplicabilidad a otros contextos. Las variables locales, entre las que se encuentras la radiación solar disponible, el régimen de precipitaciones, la temperatura media, el tipo de suelo, la estructura de las explotaciones agrícolas y los marcos regulatorios vigentes, condicionan de forma decisiva el comportamiento de estos sistemas, de modo que los resultados obtenidos en una región no son directamente transferibles a otra sin adaptaciones específicas [10]. Esta fragmentación regional no solo limita el alcance de las conclusiones científicas, sino que también dificulta el diseño de políticas agrícolas y energéticas informadas en territorios donde la tecnología aún no ha sido evaluada sistemáticamente. La necesidad de estudios que incorporen estrategias adaptadas a condiciones regionales concretas es, por tanto, una de las principales justificaciones del presente trabajo.

6.1.2. Condiciones específicas de Euskadi

El análisis de la viabilidad de los sistemas agrivoltaicos en Euskadi requiere considerar las condiciones específicas del territorio en cuatro dimensiones interrelacionadas: el recurso solar disponible, las características agroclimáticas, la estructura del uso del suelo y el marco de política energética autonómica. La confluencia de estas variables configura un contexto diferenciado

respecto a otras regiones europeas donde la tecnología agrivoltaica está más desarrollada, lo que justifica la necesidad de un análisis regional propio que no puede suplirse con la extrapolación de resultados obtenidos en otros territorios.

6.1.2.1. Recurso solar y condiciones climáticas

Euskadi presenta unas condiciones de radiación solar moderadas en el contexto español. Los datos de irradiación global media diaria de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) sitúan la radiación de media a Bilbao, Vitoria-Gasteiz y Donostia entre 1,28 y 1,40 kWh/m^2 (Ilustración 27). Valores significativamente inferiores a los registrados en el centro y sur de la península, donde ciudades como Córdoba, Sevilla o Almería, superan los 2,20 kWh/m^2, en el mismo periodo. Esta diferencia se explica en gran medida por el régimen de nubosidad característica del clima atlántico que domina la cornisa cantábrica.

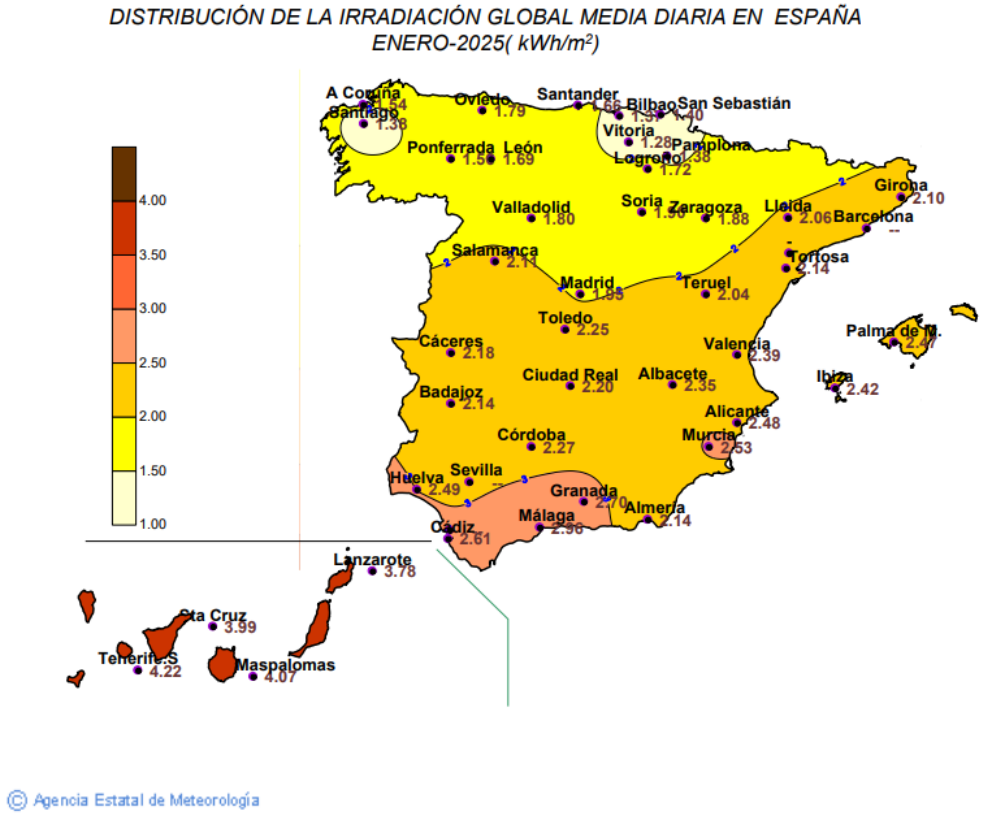


Ilustración 27. Distribución de la irradiación global media diaria en España. Enero 2025. [21]

Los datos de cobertura nubosa de Euskalmet para las tres capitales vascas mostradas en la Ilustración 28 con claridad este patrón: en Bilbao y Donostia, los días cubiertos superan sistemáticamente a los días despejados a lo largo de todo el año, con valores de días cubiertos que se sitúan en torno a 15-18 días al mes en los periodos de otoño e invierno, mientras que los días despejados apenas alcanzan los 3-5 días mensuales en esos mismos periodos. Vitoria-Gasteiz presenta un comportamiento algo más favorable, con una mayor presencia de días despejados especialmente durante los meses de verano, lo que la aproxima parcialmente al clima más continental de la Llanada Alavesa.

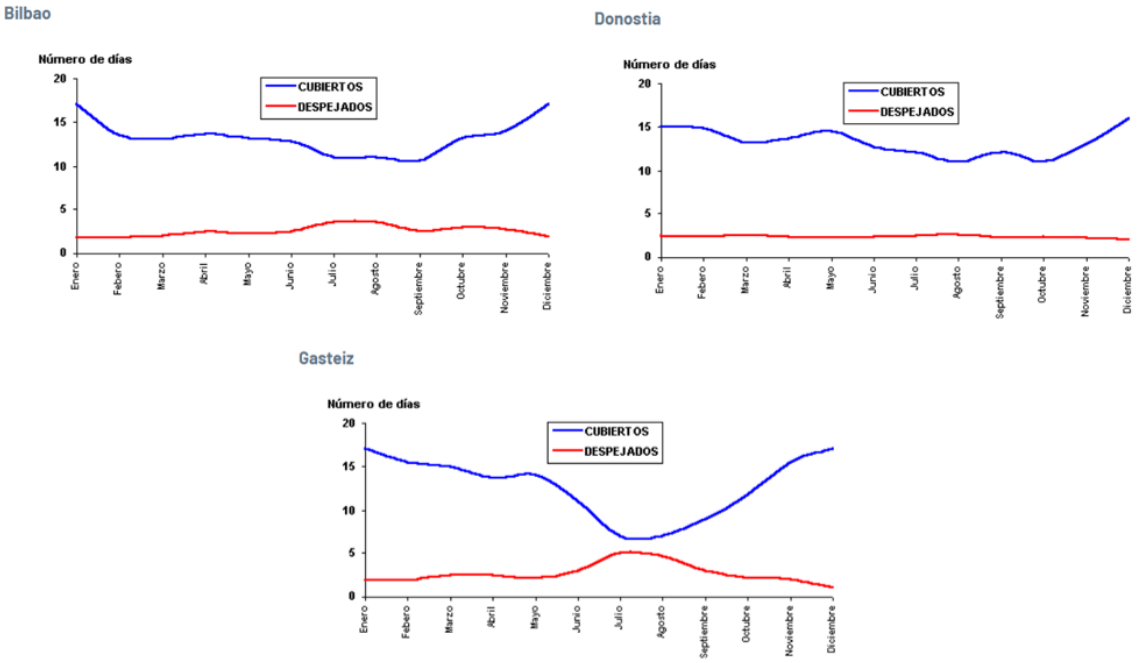


Ilustración 28. Cobertura nubosa en Bilbao, Donostia y Gasteiz [22].

El régimen de precipitaciones refuerza esta caracterización. Las gráficas de Euskalmet (Ilustración 29) muestran que las tres capitales vascas presentan precipitaciones mensuales elevadas y distribuidas a lo largo de todo el año, con valores que oscilan entre los 60 y los 160 mm mensuales según la estación y localidad, siendo Donostia la capital con mayores precipitaciones acumuladas.

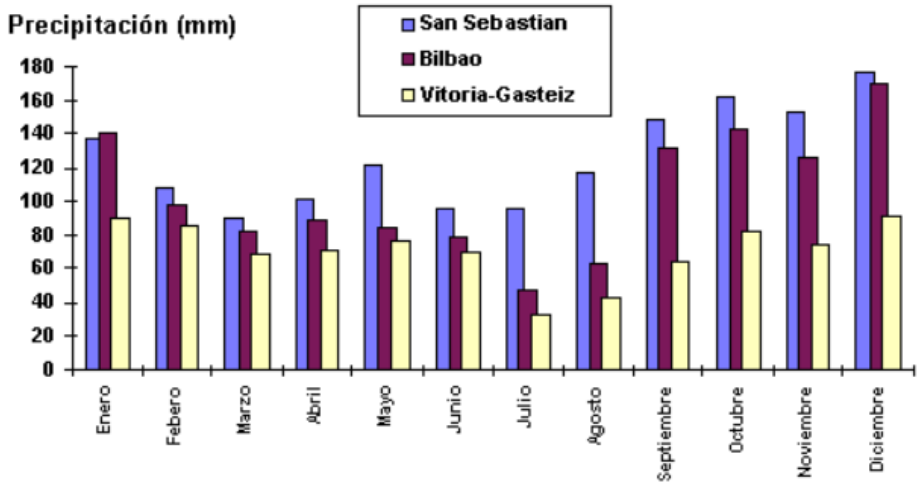


Ilustración 29. Precipitaciones mensuales de las tres capitales vascas. [22]

Esta elevada pluviometría, combinada con la nubosidad característica, configura un escenario de radiación difusa predominante frente la radiación directa, lo que tiene implicaciones directas sobre el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos convencionales y sobre la selección del tipo de módulo más adecuado en un sistema agrivoltaico.

En términos de potencial fotovoltaico, la distribución del potencial de aprovechamiento neto elaborado por el Gobierno Vasco [23] sitúa a la energía fotovoltaica como la fuente con mayor potencial de nueva potencia a instalar en el territorio, representando el 35,5 % del total, por delante de la energía eólica (30,6 %) y la biomasa (15,9 %) (Ilustración 30). Este dato es relevante porque indica que, a pesar de las limitaciones climáticas descritas, la fotovoltaica sigue siendo la fuente renovable con mayor margen de desarrollo en Euskadi, lo que otorga a la agrivoltaica un papel estratégico como vía para desplegar esa capacidad minimizando la competencia con el suelo agrícola.

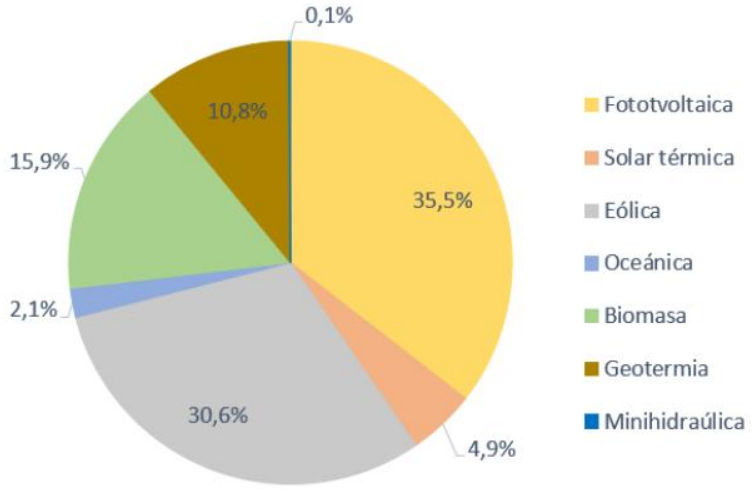


Ilustración 30. Distribución del potencial de aprovechamiento neto (nueva potencia a instalar). [23]

6.1.2.2. Estructura agraria y uso del suelo

La estructura del uso del suelo en Euskadi presenta características que condicionan de forma significativa la viabilidad de los sistemas agrivoltaicos. Según los datos del Inventario Forestal del Gobierno Vasco (2025), la superficie total de la Comunidad Autónoma es de 722,5 miles de hectáreas, de las cuales la superficie agrícola representa únicamente 88,1 miles de hectáreas, equivalente al 12,2 % del total. En contraste, el bosque, el bosque de plantación y el matorral ocupan conjuntamente más del 60 % del territorio, lo que evidencia la escasa disponibilidad de suelo llano apto para usos agrícolas o energéticos.

La distribución por territorios históricos revela además diferencias relevantes: Álava concentra la mayor parte de la superficie agrícola, con 83,4 miles de hectáreas frente a las 2,3 de Bizkaia y las 2,5 de Gipuzkoa, lo que convierte a la Llanada Alavesa en el único ámbito territorial con superficie agrícola suficiente para albergar proyectos agrivoltaicos de escala media o grande. Esta concentración geográfica del suelo agrícola productivo limita considerablemente la extensión territorial de la tecnología en Euskadi.

Tabla 1. Distribución del suelo en la C.A. de Euskadi por tipo de uso según territorio histórico. 2025. Gobierno Vasco [24] .

	C.A. de Euskadi		Araba / Alava		Bizkaia		Gipuzkoa	
	miles Ha	% público	miles Ha	% público	miles Ha	% público	miles Ha	% público
Superficie total	**722,5**	**31,8**	**303,6**	**48,7**	**221,0**	**20,9**	**197,8**	**18,1**
Bosque	190,0	58,6	109,4	83,8	31,8	24,8	48,9	24,2
Bosque de plantación	203,6	26,9	30,1	54,4	100,4	23,9	73,1	19,7
Bosque de galería	4,9	14,8	2,5	22,2	1,4	6,0	0,9	8,4
Matorral	35,6	44,7	16,5	73,6	10,2	26,8	8,9	11,7
Herbazal	12,5	63,2	5,2	66,5	2,9	42,2	4,4	73,2
Monte sin vegetación superior	11,0	64,0	5,4	77,0	2,8	47,3	2,9	56,0
Agrícola	88,1	7,2	83,4	7,6	2,3	0,8	2,5	1,1
Artificial	38,2	2,3	10,1	5,2	17,3	1,6	10,8	0,9
Humedal	0,6	5,5	0,1	0,0	0,5	0,5	0,1	47,8
Agua	4,9	3,0	3,1	3,5	0,7	1,1	1,1	2,5
Estuarios	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,8
Autopistas y Autovías	7,0	2,7	2,3	5,0	2,4	2,3	2,3	1,1
Infraestructuras de conducción	0,7	16,7	0,1	27,0	0,5	14,1	0,1	19,5
Minería - escombreras - vertederos	2,3	21,2	0,8	36,6	0,9	14,8	0,6	10,4
Prado con setos / con sebes	5,0	6,4	1,4	4,9	3,1	7,9	0,5	1,0
Prado	85,6	7,3	14,0	14,2	35,3	9,1	36,3	2,8
Pastizal-matorral	34,2	53,1	19,3	51,5	8,4	58,0	4,4	51,1

Los datos de superficie y producción por cultivo de [23] muestran que los cultivos predominantes en Álava incluyen el trigo, la cebada y la veza, junto con una notable superficie dedicada a la vid transformada. En Gipuzkoa y Bizkaia el peso de los cultivos herbáceos es muy reducido, predominando en cambio los prados y pastizales vinculados a la ganadería extensiva. Esta estructura agraria es relevante para la agrivoltaica porque los cultivos de cereal y los pastos son precisamente las tipologías más compatibles con los sistemas agrivoltaicos documentados en la literatura para latitudes similares, como los casos analizados en Suecia, Dinamarca y Alemania recogidos en el apartado 6.3 de este documento.

La ganadería extensiva, con su presencia significativa en Bizkaia y Gipuzkoa, abre además la posibilidad de sistemas *livestockvoltaics* sobre pastos, como se describió en el apartado 2.1, presenta una alta compatibilidad estructural y menores costes de instalación que los sistemas sobre cultivos herbáceos mecanizados.

La Ilustración 31 representa la evolución de la superficie y producción agrícola de distintos cultivos entre 2005 y 2024. En general, la superficie cultivada se mantiene bastante estable a lo largo del periodo, pero la producción muestra una mayor variabilidad interanual. En 2023, destacan el trigo y la uva transformada, concentrándose la mayor parte de su superficie y producción en Álava.

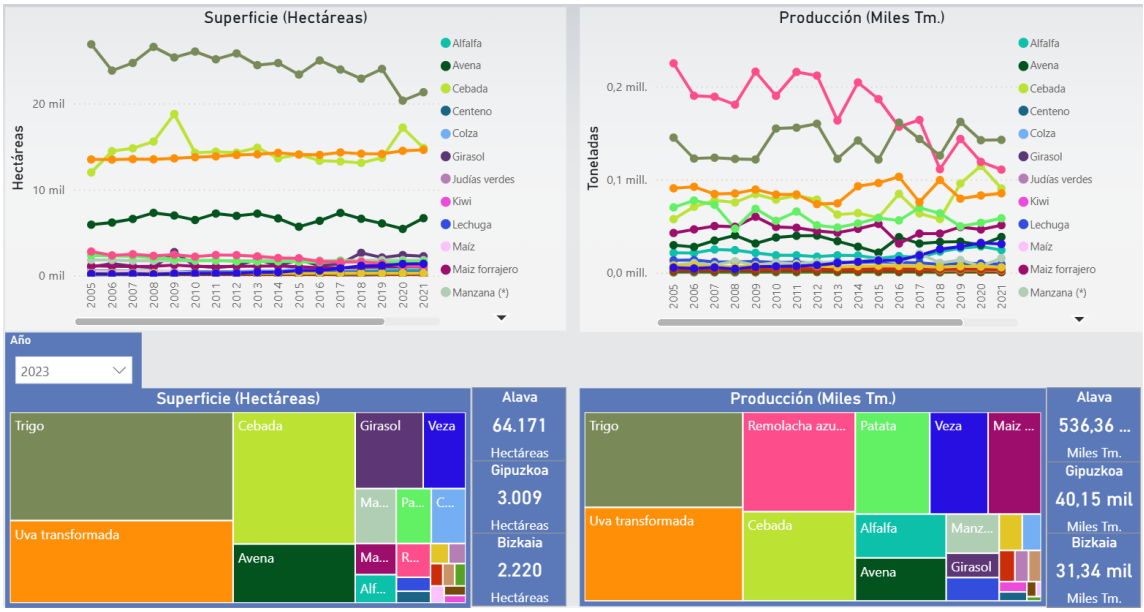


Ilustración 31. Superficie y producción por cultivo 2005-2024 [25].

6.1.2.3. Orografía y disponibilidad de suelo

La topografía del País Vasco constituye una de las limitaciones estructurales más relevantes para el despliegue de cualquier tecnología fotovoltaica en suelo, incluyendo la agrivoltaica. El territorio está conformado principalmente por los Montes Vascos y la sierra de Cantabria al sur, con altitudes que alcanzan los 1.453 metros en Larrasa y los 1.551 metros en el monte Aitxuri, situado en el parque natural de Aizkorri. Las estribaciones del Pirineo llegan desde Navarra por este, configurando un relieve accidentado que reduce drásticamente la superficie de terreno llano o con pendiente moderada apta para instalaciones fotovoltaicas.

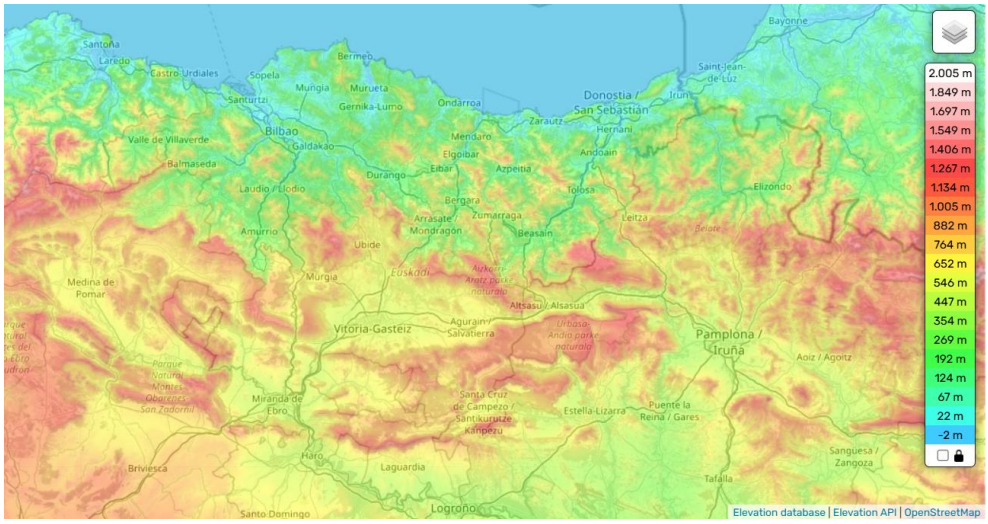


Ilustración 32. Topografía del País Vasco. [26]

Esta limitación orográfica, combinada con la escasa superficie agrícola disponible y la presión urbanística sobre el suelo llano, configura un escenario de alta competencia por el territorio que es precisamente el contexto en el que los sistemas agrivoltaicos ofrecen mayor valor diferencial, al permitir la coexistencia de la generación energética y la actividad agrícola en el mismo espacio sin necesitar suelo adicional.

6.1.2.4. Marco de política energética

Euskadi dispone de un marco de planificación energética y climática propio y articulado en varios niveles. La Estrategia de Cambio Climático KLIMA 2050 establece los objetivos de largo plazo, mientras que la Estrategia Energética de Euskadi 2030 y el Plan de Transición Energética y Cambio Climático 2021-2024 definen los instrumentos de corto y medio plazo. Este último se configura como la antesala de la Hoja de Ruta de Transición Energética y Cambio Climático de Euskadi a 2050 y la Ley de Transición Energética y Cambio Climático. Este marco normativo autonómico se articula a su vez con los instrumentos estatales, el PNIECC 2021-2030 y el PNACC 2021-2030, y con los europeos, el Pacto Verde Europeo y la Ley Europea del Clima.

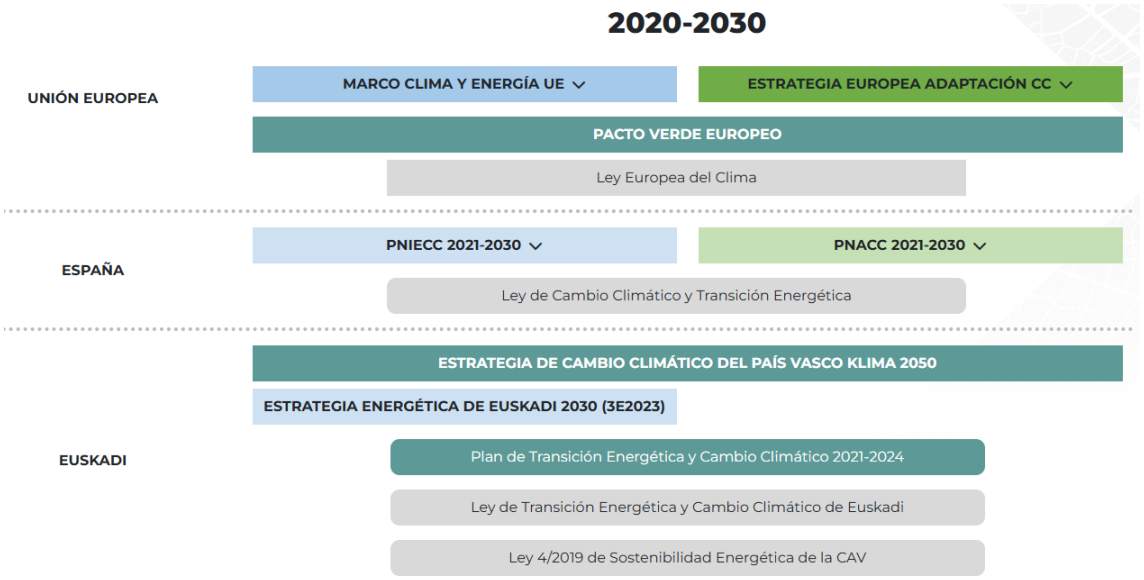


Ilustración 33. Estrategia de Cambio Climático del País Vasco, KLIMA 2050. [27]

Sin embargo, a pesar de que la fotovoltaica representa el mayor potencial de nueva capacidad renovable a instalar en el territorio, el despliegue de parques solares en suelo en Euskadi ha encontrado resistencias sociales y urbanísticas significativas. El mapa de zonas viables medioambiental y urbanísticamente elaborado por el EVE muestra que las zonas aptas para instalaciones fotovoltaicas en suelo son escasas y se concentran principalmente en la Llanada Alavesa, con una presencia muy limitada en Bizkaia y Gipuzkoa.

Esta restricción territorial hace que la agrivoltaica, al integrar la generación fotovoltaica en terrenos ya en uso agrícola sin ocupar suelo adicional, pueda representar una vía para conciliar los objetivos de la transición energética con las limitaciones de disponibilidad de suelo y las resistencias sociales al despliegue de instalaciones convencionales en suelo.

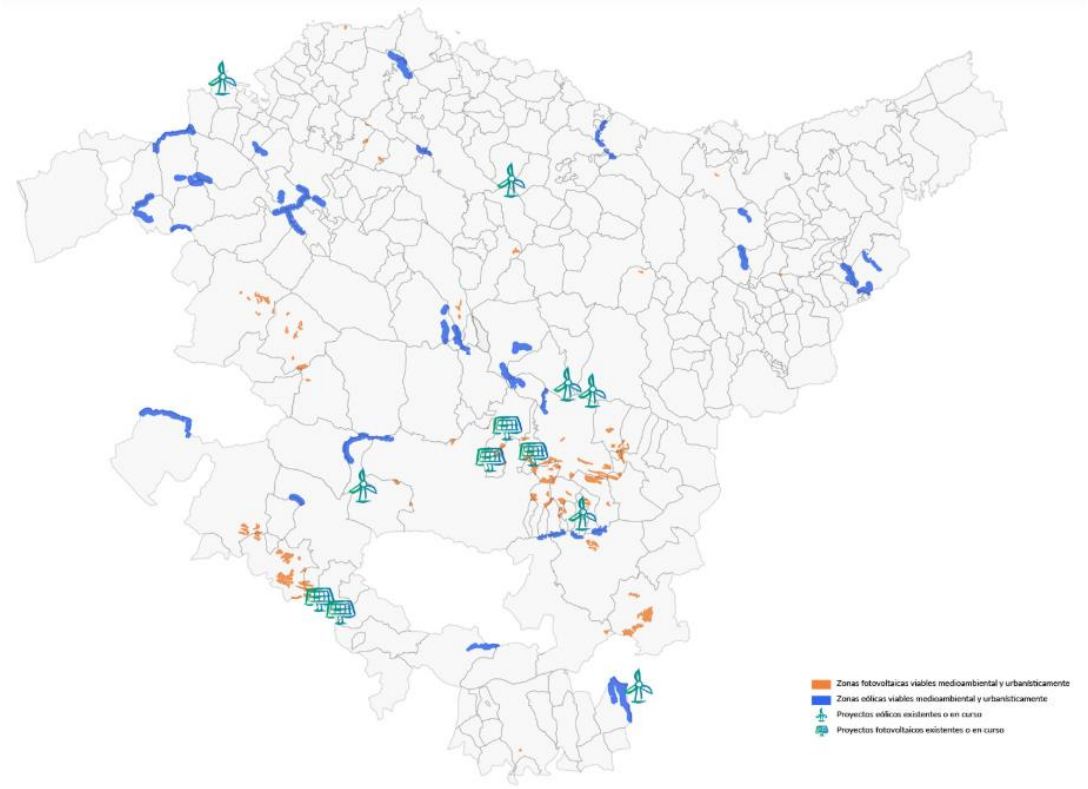


Ilustración 34. Zonas viables medioambiental y urbanísticamente definidas según los criterios del PTS Energías Renovables, PTP Álava-Araba Central y PGOU Vitoria-Gasteiz [38].

La convergencia de estas cuatro dimensiones configura un escenario en el que los sistemas agrivoltaicos pueden ofrecer una respuesta específicamente adaptada a las condiciones de Euskadi: permiten conciliar los objetivos de la transición energética con las limitaciones de disponibilidad de suelo, la presión urbanística y las resistencias sociales al despliegue fotovoltaico convencional, siempre que el diseño de los sistemas tenga en cuenta la menor disponibilidad de radiación directa y la necesidad de configuraciones adaptadas a condiciones de alta radiación difusa.

6.2. Metodología

Con el objetivo de analizar experiencias agrivoltaicas desarrolladas en el contexto europeo y valorar su posible aplicación en Euskadi, la metodología adoptada en este trabajo se basa en una revisión bibliográfica y en el análisis comparativo de casos de estudio. Este enfoque permite evaluar de forma sistemática distintos proyectos reales mediante una matriz diseñada específicamente para este estudio. Esta herramienta facilita la organización homogénea de la información recogida sobre cada caso e identifica tanto las características técnicas y productivas de los sistemas agrivoltaicos, como los factores sociales, económicos y regulatorios que condicionan su implantación.

6.2.1. Descripción de la metodología

La metodología se estructura en cuatro fases consecutivas, que van desde la definición de los criterios de análisis hasta la obtención de conclusiones sobre la transferibilidad de los modelos agrivoltaicos estudiados al contexto de Euskadi. La Ilustración 35, sintetiza las principales etapas del procedimiento seguido en este trabajo.



Ilustración 35. Metodología de estudio. Elaboración propia.

En la primera fase, se ha elaborado una matriz de análisis a partir del marco teórico previamente desarrollado mediante la revisión bibliográfica. Este marco recoge los principales elementos que caracterizan los sistemas agrivoltaicos en sus dimensiones técnica, agronómica, económica, social y regulatoria. Sobre esta base, se han definido las variables y subvariables que conforman la matriz.

En la segunda fase, se han seleccionado los casos de estudio, atendiendo a criterios de viabilidad y representatividad. Para ello, se ha considerado las principales tipologías de sistemas agrivoltaicos, su localización geográfica, su grado de desarrollo (experimental o comercial) y la disponibilidad de información publicada. La muestra resultante es heterogénea y pretende recoger algunas de las configuraciones más habituales en el ámbito europeo, procurando que los casos sean relevantes tanto desde el punto de vista técnico, como comparables a nivel territorial.

En la tercera fase, se ha llevado a cabo el análisis individual de los proyectos seleccionados incorporando de forma sistemática la información disponible de cada caso a la matriz de análisis definida. Con base en esta información, se ha elaborado una descripción detallada de cada proyecto, abordando sus principales características técnicas, productivas y de gestión.

Finalmente, en la cuarta fase, se ha realizado un análisis comparado o de conjunto, orientado a identificar patrones comunes, divergencias significativas y factores clave en el funcionamiento de los sistemas agrivoltaicos estudiados. Este análisis permite evaluar qué configuraciones presentan mayor potencial y extraer conclusiones sobre la posible transferibilidad al contexto de Euskadi, señalando tanto las oportunidades como las limitaciones asociadas a su implantación.

6.2.2. Matriz de análisis propuesta

La matriz de análisis constituye la herramienta central del presente estudio, al estructurar y comparar de manera sistemática la información correspondiente a los distintos casos agrivoltaicos analizados. Para cada dimensión considerada, se han definido variables específicas, con sus correspondientes valores de referencia o unidades de medida asociadas, lo que permite tanto el análisis individual de cada caso como su posterior comparación.

Tabla 2. Matriz de análisis.

Dimensión	Variables	Subvariables (si procede)	Posibles valores (y unidades)
Caracterización del sistema	Nombre	-	
	País	Región	
	Promotor	-	
	Estado	Tipo de implementación	Experimental / Piloto / Comercial
		Operatividad	Operativo / No operativo
	Objetivos	-	
	Tipo de aplicación	-	*Livestockvoltaics* / *Crop-based* / *Aquavoltaics* / *Zoovoltaics*
	Tipo de cultivo	Nombre (variedad)	
		Tipo de planta	C4 / C3 / CAM
Tipología del sistema	Configuración estructural	Grado de cerramiento	Abierto / Cerrado
		Disposición espacial (altura / distancia)	*Interspace* / *Overhead*
		Acceso a maquinaria	Si / No
		Densidad de módulos	CGR [%] Cobertura de superficie [Wp/m^2]
		Orientación	N / S / E / O
		Inclinación	[º]
		Tecnología de movimiento	Fijo / dinámico (seguimiento 1 eje, seguimiento 2 ejes, otros)
	Módulo	Tipo	Monofacial / Bifacial / Semitransparente
		Concentración	Si / No
		Material	Silicio cristalino / Capa fina / Otros
		Eficiencia	[%]
		Potencia unitaria	[Wp]
		Número de módulos	
		Potencia total	[kWp]
	Integración tecnológica	Sensórica y monitorización	Monitorización climática / Monitorización pedológica (suelo)
		Automatización y algoritmos de control	Gestión de la radiación / Gestión del microclima / Protección frente a condiciones adversas / Gestión del agua / Sistemas integrados de fertiirrigación
		Herramientas utilizadas	
Producción agrícola y generación de energía reportados	Efectos	Sombreado y Microclima	PAR y PPFF / Temperatura del suelo y del aire / Humedad / Viento
		Agua	Evapotranspiración / Ahorro de agua
		Calidad del cultivo	Calidad nutricional / Composición química / Propiedades organolépticas
		Resiliencia climática	Daños por calor / Estrés térmico
	Productividad agrícola	Rendimiento	[%]
		LER	[-]
	Productividad energética	Producción energética	[MWh/año]
		Producción específica	[kWh/kWp]
Factores económicos	Inversión	Cuantía inicial / CAPEX / OPEX	[€]
	Financiación	-	Pública / Privada / Mixta
	Fuentes de ingresos	Autoconsumo eléctrico	
		Venta de electricidad	
		Beneficios producción agrícola	
	Rentabilidad	-	Porcentaje / Grado
Marco regulatorio y factores sociales	Aceptación social	Afectación del paisaje	
		Participación comunitaria en el diseño	
		Modelo de propiedad	
		Distribución de beneficios	
		Acceso a incentivos públicos	
	Marco regulatorio	Norma de referencia	
		Protección ambiental y fauna	

6.3. Proyectos agrivoltaicos en Europa y elección de una muestra para su análisis

Diversos países, entre los que destacan Italia, Francia y Alemania, están apostando por el despliegue de sistemas agrivoltaicos a gran escala con el doble objetivo de proteger los cultivos frente a fenómenos meteorológicos extremos y de incrementar la rentabilidad tanto agrícola como energética. La selección de una u otra configuración agrivoltaica no responde únicamente a criterios técnicos, sino que está estrechamente vinculada a factores contextuales como la localización geográfica, la disponibilidad de radiación solar, las condiciones edafoclimáticas y los tipos de cultivo predominantes [7].

A continuación, se presentan algunos de los casos documentados en la literatura para distintos países europeos, organizados por país y tipo de configuración, con sus principales variables técnicas, agronómicas y económicas.

En **Suecia** se han analizado cuatro configuraciones aplicadas a una rotación de cultivos que incluye trigo, patata, remolacha azucarera, pasto y cebada. El sistema de seguimiento de un eje (1T) con módulos bifaciales, separación entre filas de unos 10 m, inclinación aproximada de 30º y altura cercana a 3 m ofrece un incremento de rendimiento cercano al 18 % respecto a sistemas verticales, con buen aprovechamiento de la radiación difusa y valor actual neto positivo (VAN), aunque con una inversión inicial algo mayor. El sistema vertical fijo (VF) con paneles bifaciales a unos 0,7 m del suelo y separación de 10 m entre filas, presenta un buen desempeño en condiciones de cielo cubierto y baja inclinación solar, con un coste nivelado de la energía inferior en aproximadamente un 14 % frente a sistemas con seguimiento y una producción más estable a lo largo del año. El sistema elevado (EAVS) con estructuras de unos 3 m de altura, inclinación cercana a 30º y separación de 10 m permite el paso de maquinaria, con un rendimiento mejor que el de los sistemas verticales en invierno, aunque inferior en verano frente a los seguidores. El sistema fotovoltaico convencional en suelo (CGMPV) presenta un buen retorno económico y alto valor actual neto, aunque con un coste de energía relativamente elevado frente a sistemas con seguimiento y con mayor ocupación de terreno [7].

En **Dinamarca** se han evaluado las mismas cuatro configuraciones aplicadas a condiciones propias de climas del norte, con los mismos cultivos de referencia que en Suecia. El sistema 1T ofrece un buen equilibrio entre coste y producción en latitudes altas, con una mejora significativa del rendimiento respecto a sistemas verticales de entre un 20 y un 25 %. El sistema VF presenta un mejor comportamiento en condiciones de baja irradiancia, con menor CAPEX, pero también una producción más limitada. El sistema EAVS presenta en invierno una producción superior a los sistemas verticales de aproximadamente un 10 %, favorecida por una mejor ventilación. El sistema CGMPV presenta un valor actual neto elevado, y rentabilidad económica muy favorable [7].

En **Alemania** se han analizado las cuatro configuraciones aplicadas a una rotación de cultivos más amplia que incluye trigo, pasto, patata, remolacha azucarera, cebada, calabaza, soja y lechuga. El sistema 1T ofrece una buena relación entre inversión y producción, con un menor coste nivelado de la energía y un valor actual neto elevado. El sistema VF presenta menores costes de inversión, aunque con una producción energética más limitada siendo especialmente adecuado para regiones con alta radiación difusa y baja altura solar. El sistema EAVS proporciona un equilibrio adecuado entre producción de energía y actividad agrícola, con un coste nivelado de la energía en valores intermedios. El sistema CGMPV presenta una rentabilidad económica elevada con costes relativamente reducidos y un coste nivelado de la energía competitivo [7].

En **Italia** se han evaluado las cuatro configuraciones aplicadas a una rotación que incluye calabacín, patata, soja, remolacha azucarera, cebada, trigo, pasto y lechuga. El sistema 1T presenta el mejor desempeño económico entre las configuraciones analizadas, destacando por su bajo coste nivelado de la energía y alta rentabilidad. El sistema VF presenta un comportamiento particularmente favorable durante el invierno, especialmente en condiciones de baja radiación solar. El sistema EAVS supera en producción energética al sistema vertical, especialmente en verano, compensando el mayor coste estructural. El sistema CGMPV presenta una rentabilidad económica muy elevada con un alto valor actual neto y un coste de energía competitivo [7].

En **Bélgica** se han documentado tres configuraciones aplicadas al cultivo de remolacha y peral. El sistema de seguimiento de un eje bifacial incrementa la captación energética, aunque se observa una reducción de la producción del cultivo debido a la sombra generada. El sistema vertical bifacial intercalado, con separación entre filas de aproximadamente 9 m y una altura cercana a 2,6 m, presenta una menor densidad de instalación que facilita el uso agrícola del terreno. El sistema elevado semitransparente bifacial de doble inclinación aplicado al peral presenta ciertos efectos negativos como compactación del suelo y pérdidas moderadas de terreno útil durante el primer año de operación, aunque mejora la generación eléctrica con incremento del LER y ofrece protección al cultivo frente al granizo [7].

En **España** se han documentado dos configuraciones de paneles monofaciales fijos elevados a unos 5 m. La primera configuración se aplica a una rotación temprana de patata (cada 4 años: patata, colza, cebolla, haba, maíz), presenta una rentabilidad positiva con una TIR superior al coste de capital, y destaca la reducción del consumo de agua gracias al sombreado generado. La segunda aplicada a una rotación de tomate de industria (cada 4 años: tomate, melón, zanahoria, cebolla, guisante), obtiene una rentabilidad aceptable, con una TIR superior al coste del capital bajo las condiciones evaluadas [7].

En **Portugal** se han analizado dos configuraciones aplicadas a los cultivos de tomate y lechuga. El sistema elevado (EAVS) con diferentes configuraciones de densidad y potencia según la localización presenta valores de LER superiores a 1, confirmando la ventaja del uso combinado del suelo. El sistema de seguimiento de un eje espaciado (1T espaciado) mejora el indicador LER respecto a otras configuraciones, demostrando una integración eficiente entre producción agrícola y generación eléctrica [7].

En **Hungría** se ha documentado un sistema de cubierta elevada (*Elevated Shed AVS*) aplicado al cultivo de manzano, con inclinación aproximada de 25-55º. La sustitución de redes antigranizo por paneles solares permite reducir el CAPEX en torno a un 26 % y el OPEX cerca de un 9 %, integrando ambas funciones en una sola infraestructura. La configuración presenta un coeficiente de ocupación del terreno en torno al 31 %, con una relación superficie módulo/suelo de aproximadamente 1 m² por cada 1,64 m² de terreno [7].

La plataforma Agrisolar Europe ofrece un mapa interactivo, Ilustración 36, que recoge los proyectos agrivoltaicos activos en Europa, permitiendo visualizar de forma clara la distribución geográfica y las principales características de las instalaciones existentes. El mapa puede filtrarse según múltiples variables y poder así tener una visión global del desarrollo del sector.



Ilustración 36. Mapa de proyectos agrivoltaicos Agrisolar [28].

En cuanto a la potencia instalada, los proyectos se clasifican en cuatro rangos diferenciados por colores: los de menor escala, menor de 1 kW, de verde; entre 1 kW y 5 MW, de morado; entre 5 y 20 MW, de amarillo; y los de mayor tamaño, entre 20 y 100 MW de naranja. Asimismo, se distingue entre distintas tipologías tecnológicas, como sistemas orientados a la biodiversidad, cultivos, soluciones dinámicas, instalaciones sobre suelo, entre hileras, elevadas, invernaderos solares o configuraciones verticales. También se incluye la aplicación agrícola de cada proyecto, diferenciando entre proyectos orientados a biodiversidad, cultivo o ganadería. Por último, se puede identificar la naturaleza de las instalaciones como comerciales o piloto, así como la compañía responsable [28].

La distribución espacial que muestra el mapa refleja una clara concentración de proyectos en Europa central y occidental, especialmente en países como Francia, Alemania o Suiza. En contraste, su presencia es todavía limitada en la península ibérica y en los países del este europeo, lo que indica un desarrollo aún emergente de la agrivoltaicos en estas regiones.

6.4. Análisis de una muestra de proyectos agrivoltaicos

6.4.1. Caracterización de la muestra

Con el fin de realizar un análisis comparativo representativo, se ha seleccionado una muestra de cinco proyectos agrivoltaicos en Europa. Estos casos representan distintos contextos geográficos, modelos de gestión y niveles de desarrollo tecnológico. La Tabla 3 recoge las principales características generales de cada caso de estudio, incluyendo su localización, promotores, estado actual, objetivos y tipo de cultivo asociado. Esta información permite situar cada proyecto en su contexto y comprender las diferencias iniciales que pueden influir en su rendimiento técnico, productivo y económico.

Asimismo, proporciona una base común para las comparaciones desarrolladas en los apartados posteriores.

Tabla 3. Caracterización de los proyectos seleccionados.

Variable	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Fuentes de información	[29], [30]	[31], [9]	[32], [33]	[34]	[35], [36], [37]
Nombre	Domaine de Nidolères	Hofgemeinschaft Heggelbach	Agrivoltaica San Gabriel	Agrivoltopolis	Insolagrin
País (Región)	Francia (Occitania)	Alemania (Baden-Württemberg)	España (Ribera del Duero)	España (Barcelona)	Suiza (Valais)
Promotor	Sun'Agri, Sun'R Investissement, Familia Escudié	Fraunhofer ISE + socios (Hohenheim, KIT, BayWa r.e., EWS, Heggelbach)	PowerfulTree, CIFP San Gabriel, Solar 360 Repsol, Basquenergy Custer	UPC-EEABB (Agrotech-UPC)	Insolight, Romande Energie y Agroscope (+ cantón Valais)
Estado	Piloto, operativo desde 2018	Piloto, finalizado en 2021 (operativo 2016-2021)	Piloto, operativo desde 2024	Piloto, operativo desde 2025	Piloto, operativo desde 2021
Objetivos	Proteger el viñedo del calor y estrés hídrico, mejorar calidad del vino	Demostrar viabilidad técnica, económica y social en agricultura extensiva	Sombreado dinámico sobre viñedo para mejorar calidad de la uva	Evaluar efecto de niveles de cobertura FV sobre hortícolas	Sustituir túneles/invernaderos por estructuras PV con protección climática
Tipo de aplicación	*Crop-based*	*Crop-based*	*Crop-based*	*Crop-based*	*Crop-based*
Cultivo	Vid (Grenache blanc, Marselan, Chardonnay) (C3)	Trigo, patatas, apio, trébol (C3)	Vid (uva de transformación, Tempranillo) (C3)	Lechuga y brócoli (C3)	Fresas, frambuesas, arándanos, frutales (C3)

Además se indica la fuente de la que se ha extraído la información. A partir de este punto, todos los textos e imágenes se basan en dichas referencias, salvo en aquellos casos en los que se indique explícitamente lo contrario. Esto se hace con el fin de simplificar la presentación de la información.

- **Caso 1: Nidolères (Francia)**

El proyecto ubicado en la finca Nidolères, en Tresserre, (Occitania), representa un caso relevante de aplicación de la agrivoltaica en la viticultura. La iniciativa surge de la colaboración entre varios actores: Sun'Agri, responsable del diseño, la gestión técnica y el pilotaje del sistema; Sun'R Investissement, como inversor a través de la sociedad de proyectos SPES Tresserre; y el propio Domaine de Nidolères (familia Escudié), propietario de las parcelas y encargado de la explotación agrícola, con una tradición vitivinícola de ocho generaciones.

Su desarrollo responde a los efectos del cambio climático sobre la producción, que estaban alterando progresivamente la calidad de sus vinos, elevando el contenido de azúcar y reduciendo su acidez. En este contexto, la instalación agrivoltaica se plantea como una herramienta de gestión agronómica orientada a corregir estos desequilibrios.



Ilustración 37. Finca Nidolères. Sistema abierto elevado.

Actualmente, el sistema se encuentra operativo: la primera parcela, considerada uno de los primeros sistemas agrivoltaicos dinámicos sobre viñedo, entró en funcionamiento en 2018 sobre una superficie de 4,5 hectáreas, y posteriormente fue ampliada en 2023.

El propósito del proyecto es adaptar la viticultura a las nuevas condiciones climáticas, mitigando factores como el estrés térmico y el déficit hídrico. Al mismo tiempo, busca mejorar la calidad del vino, especialmente el equilibrio entre acidez y grado alcohólico, incrementar los rendimientos y garantizar la viabilidad económica de la explotación a largo plazo. La generación de energía fotovoltaica actúa como un valor añadido, complementando la actividad agrícola sin desplazarla.

- **Caso 2: Heggelbach (Alemania)**

En el sur de Alemania, cerca del lago Constanza se sitúa la finca Hofgemeinschaft Heggelbach, una explotación agrícola biodinámica de aproximadamente 165 hectáreas con más de treinta años de actividad. Este entorno real permitió desarrollar el proyecto APV-RESOLA, iniciado en 2016 y finalizado formalmente en 2021, aunque la investigación y el análisis de resultados continúan en la actualidad.



Ilustración 38. Explotación biodinámica finca Hofgemeinschaft Heggelbach.

El proyecto fue coordinado por el Fraunhofer ISE como entidad coordinada, en colaboración con distintos socios científicos, industriales y territoriales, como la Universidad de Hohenheim, el KIT (ITAS), BayWa r.e. y Elektrizitätswerke Schönau (EWS), además de la propia explotación agrícola.

El sistema entró en operación en 2016 con el objetivo principal de demostrar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de la agrivoltaica en condiciones reales de agricultura extensiva. A diferencia de otros enfoques más experimentales, en este proyecto se trabaja a escala real con cultivos habituales.

Se trata de una aplicación *crop-based*, integrada en un sistema de rotación de cultivos que incluye trigo de invierno, patata, apio y trébol, gestionados bajo criterios biodinámicos. Más que centrarse en mejorar un cultivo concreto, el interés radica en analizar cómo este tipo de sistema puede adaptarse a una explotación agrícola convencional.

- **Caso 3: San Gabriel (España)**

El proyecto Agrivoltaica San Gabriel (Grupo Operativo AGRITIVOLTAICA), ubicado en el CIFP San Gabriel de Aranda de Duero, en la Denominación de Origen Ribera del Duero (España). Se trata de la primera instalación agrivoltaica con sombreado dinámico real sobre viñedo en España, desarrollada en una parcela experimental de 68 cepas de Tempranillo en sistema de doble cordón.



Ilustración 39. Proyecto Agrivoltaica San Gabriel con sombreado dinámico sobre viñedo.

Su desarrollo se apoya en la colaboración entre distintos perfiles: PowerfulTree como desarrollador tecnológico y responsable del algoritmo de sombreado, el CIFP San Gabriel como entidad anfitriona y experimental, y Solar 360 Repsol como socio técnico en el desarrollo de la instalación. Además, intervienen otros agentes del sector vitivinícola como bodegas de la D.O, entidades académicas como la Universidad de Jaén y el Basquenergy Clúster, que actúa como coordinador del grupo operativo. Este conjunto de participantes refuerza el carácter aplicado y transferible del proyecto.

Tras dos campañas completas (2024 y 2025), el sistema ya dispone de resultados que permiten comparativas entre distintos años. El objetivo principal no se limita a mantener la calidad de la uva, sino mejorarla activamente mediante la gestión dinámica del microclima, haciendo frente a problemas derivados del cambio climático como el exceso de radiación y las altas temperaturas, permitiendo retrasar el proceso de maduración fenológica y optimizar parámetros como azúcares, acidez y compuestos fenólicos.

- **Caso 4: Agropolis (España)**

El demostrador agrivoltaico "Agrivoltopolis", desarrollado en el recinto experimental de Agropolis, gestionado por la Escuela de Ingeniería Agroalimentaria y de Biosistemas (EEABB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) en Barcelona (España). Agropolis constituye una instalación de innovación agroalimentaria de aproximadamente 9,14 hectáreas, integrada en el ecosistema de *living labs* Agrotech-UPC, que combina parcelas de cultivo, invernaderos y equipamiento técnico.

La estructura agrivoltaica se instala sobre una parcela experimental y tiene un carácter orientado a la investigación, concebida como banco de pruebas para analizar la relación entre sistemas fotovoltaicos y cultivos hortícolas en condiciones mediterráneas.



Ilustración 40. Recinto experimental de Agropolis.

El sistema se encuentra operativo, habiendo completado su primer año de actividad con dos ciclos de cultivo (verano y otoño de 2025), y con continuidad prevista dentro de un programa de investigación más amplio.

El objetivo no es maximizar la producción, sino evaluar como distintos niveles de sombreado fotovoltaico afectan al desarrollo y rendimiento de cultivos. Para ello se comparan tres escenarios: cobertura opaca (5 % de transmitancia), cobertura semitransparente (40 %) y cultivo a cielo abierto como referencia.

Se trata de una aplicación *crop-based*, centrada en cultivos hortícolas, concretamente lechuga y brócoli.

- **Caso 5: Conthey (Suiza)**

El proyecto analizado corresponde a la solución agrivoltaica "Insolagrin", desarrollada por la empresa suiza Insolight e implantada en Conthey, en el cantón de Valais (Suiza). Se trata de un sistema piloto iniciado en 2021 sobre cultivos de fresas y frambuesas, que ha evolucionado progresivamente hasta incorporar, en 2025, nuevas instalaciones sobre frutales, ampliando así su campo de aplicación.

El desarrollo del proyecto se basa en la colaboración entre distintos actores con funciones complementarias: Insolight, como proveedor tecnológico; Romande Energie, responsable de la inversión y operación energética; y Agroscope, que aporta el soporte científico y experimental. Además, en fases recientes, también participa el cantón de Valais como actor institucional.



Ilustración 41. Solución agrivoltaica "Insolagrin" en Conthey, cantón de Valais, Suiza

El sistema se encuentra operativo y en expansión, con varias instalaciones activas sobre diferentes cultivos (fresas, frambuesas, arándanos y frutales como manzano, peral y albaricoquero). Su planteamiento busca reemplazar las infraestructuras agrícolas convencionales, como túneles e invernaderos, por un sistema que permita combinar producción agrícola y generación de energía renovable sin aumentar la ocupación del suelo. Asimismo, busca mejorar la protección frente a riesgos climáticos como granizo, heladas u olas de calor.

6.4.2. Caracterización del subsistema fotovoltaico e integración tecnológica

En este apartado se analizan las características técnicas y de diseño de cada instalación agrivoltaica. La Tabla 4 recoge las principales variables relacionadas con la tipología de los sistemas, incluyendo la configuración estructural, la disposición espacial de los módulos, la tecnología de movimiento empleada, el tipo de panel fotovoltaico y el grado de integración tecnológica. A partir de este análisis se puede observar cómo cada proyecto adapta la tecnología agrivoltaica a las necesidades específicas de los cultivos y a las condiciones de su entorno.

Tabla 4. Tipologías del sistema de los casos seleccionados.

Variable		Nidolères	Heggelbach	San Gabriel	Agropolis	Conthey
Configuración estructural	Grado de cerramiento	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Cerrado
	Disposición espacial	*Overhead* Alt: 4,5 m Dist: 2,25 m	*Overhead* Alt: 5 m Dist: 9,5 m	*Overhead* Alt: 4,10 m Dist: 3 m	*Overhead* Dist: variable	*Overhead*
	Acceso a maquinaria	Sí	Si	No reportado	Sí	No reportado
	Densidad módulos	No reportado	Cobertura de superficie ~1/3	CGR del 40 %	No reportada	60,5 Wp/m^2
	Orientación	No reportado	Suroeste	N-S	N-S (paneles E-O)	No reportado
	Inclinación	Variable	45º S	Variable	No reportado	No reportado
	Tecnología de movimiento	Dinámico, persianas móviles	Fijo	Dinámico, seguimiento 1 eje (4 trackers)	Dinámico, seguimiento 1 eje	Microseguimiento óptico (fijo + móvil)
Módulos	Tipo	No reportado	Bifacial	No reportado	Monofacial	THEIA
	Concentración	No	No	No	No especifica	Óptica
	Material	No reportado	Silicio cristalino	No reportado	Silicio cristalino	Silicio cristalino
	Eficiencia	No reportado	No reportado	No reportado	No reportado	36% laboratorio; 29% IES-UP; 20 % CSTC
	Potencia unitaria	No reportado	270 Wp	No reportado	No reportado	No reportado
	Numero de módulos	No reportado	720	No reportado	150	No reportado
Potencia total		2.100 kWp	194,4 kWp	26 kWp	50,25 kWp	242 kWp
Integración tecnológica	Sensórica y monitorización	Monitorización climática y pedológica	Estaciones microclima + producción/ autoconsumo	Monitorización climática y pedológica	Monitorización climática y pedológica	Monitorización climática y pedológica
	Automatización de control	Gestión radiación, gestión de microclima	No reportada	Gestión de radiación, gestión de microclima	Gestión de radiación, gestión de microclima	Gestión de radiación, gestión de microclima
	Herramientas	No reportado	No reportado	Gemelos digitales	Robot móvil y modelos matemáticos	Herramienta Insol'insights

- **Nidolères (Francia)**

El sistema presenta una configuración estructural abierta, lo que permite mantener la actividad agrícola sin barreras físicas relevantes. La disposición utilizada es de tipo *overhead*, con módulos fotovoltaicos elevados a una altura aproximada de 4,5 m sobre la viña, mediante una estructura tipo persianas orientables. Este diseño no solo preserva el uso agrícola del suelo, sino que también facilita la ventilación natural del cultivo y el tránsito de maquinaria.

El acceso a equipos agrícolas está garantizado gracias a la altura de la estructura y a la separación entre filas, lo que resulta esencial para la operatividad de la explotación. No obstante, algunos

parámetros técnicos, como la densidad y la orientación de los módulos, no están especificados en la documentación disponible. La inclinación de los paneles es variable, ya que las persianas son móviles y permiten ajustar el nivel de sombreado, entre 2 y 5 horas diarias, en función de las necesidades del cultivo, determinadas a partir de datos recogidos por sensores.

Uno de los aspectos más destacables es su tecnología de control dinámico, controlada por Sun'Agri, que regula automáticamente la posición de las persianas según las condiciones climáticas y agronómicas.



Ilustración 42. Paneles con inclinación variable gracias a las persianas móviles

Sobre los módulos fotovoltaicos, no se dispone de información detallada sobre sus características técnicas (tipo, material, eficiencia, potencia unitaria o número total), aunque sí se indica que no utilizan tecnologías de concentración. La instalación cuenta con una potencia total de 2,1 MWc.

El sistema cubre aproximadamente 4,5 ha de viñedo protegido, complementadas con una parcela testigo de 3 hectáreas sin cobertura, lo que permite comparar los efectos del sistema.

A nivel tecnológico, el proyecto incorpora sistemas de monitorización agronómica, en colaboración con la Cámara de agricultura de Pirineos Orientales, junto con un sistema avanzado de automatización que permite ajustar de forma continua las condiciones de sombreado para optimizar el desarrollo del cultivo.

- **Heggelbach (Alemania)**

El sistema presenta una configuración estructural abierta de tipo *overhead*, con módulos elevados sobre una estructura metálica a 5 metros de altura, lo que permite el tránsito sin restricciones de maquinaria agrícola de gran tamaño, incluidas cosechadoras.

En este caso, el sistema es fijo, sin mecanismos de seguimiento solar, lo que contrasta con otros modelos más dinámicos. Este diseño prioriza la simplicidad técnica, la robustez estructural y la compatibilidad con las prácticas agrícolas convencionales, reduciendo costes operativos y necesidades de mantenimiento.



Ilustración 43. Cultivo en planta elevada con una cosechadora de patatas

La instalación está formada por 720 módulos bifaciales de silicio cristalino (270 Wp), montados en filas separadas por 9,5 metros y con una anchura de fila de 3,4 metros, lo que genera una cobertura de aproximadamente un tercio de la superficie. Los módulos están orientados hacia el suroeste (45º respecto al sur).

La elección de tecnología bifacial permite aprovechar tanto la radiación directa como la radiación reflejada y difusa, aspecto especialmente relevante en climas centroeuropeos con mayor frecuencia de nubosidad.

La instalación alcanza una potencia total de 194,4 kWp, con una geometría diseñada para asegurar una distribución homogénea de la radiación sobre el cultivo, evitando zonas de sombra intensa.

Desde el punto de vista tecnológico, el sistema cuenta con monitorización microclimática básica, con medición de radiación, temperatura y humedad del suelo, así como seguimiento de la producción energética y del autoconsumo. No dispone de sistemas de automatización ni control dinámico.

- **San Gabriel (España)**

El sistema presenta una configuración estructural abierta, adaptada al cultivo en espaldera y diseñada para no interferir en las labores agrícolas. La instalación responde a un modelo *overhead* con una altura de 4,10 m y una separación entre filas de aproximadamente 3 m, en coherencia con el marco de plantación del viñedo.

La instalación piloto ocupa una superficie agrivoltaica de 310 m^2, con una parcela testigo equivalente, y una superficie total de módulos de 124,6 m^2. El sistema cuenta con un CGR del 40 %, lo que indica una cobertura moderada del terreno.

Lo más relevante del sistema es su configuración dinámica, basada en cuatro trackers independientes de un eje horizontal con orientación norte-sur. Frente a los sistemas convencionales, el objetivo no es maximizar la producción energética, sino optimizar las condiciones agronómicas mediante el ajuste de la radiación incidente. La inclinación de los paneles es variable y gestionada en tiempo real.



Ilustración 44. Configuración dinámica de cuatro trackers independientes de un eje horizontal.

En relación a los módulos fotovoltaicos, no se dispone de información específica sobre su tipo, material, eficiencia o número, aunque no emplean tecnología de concentración. La instalación cuenta con una potencia total de 26 kWp.

En términos de sensórica, el sistema posee una red de monitorización avanzada, compuesta por dos estaciones meteorológicas que registran variables como radiación PAR, temperatura del aire y foliar, humedad, presión, déficit de presión de vapor y potencial hídrico del suelo.

La automatización del sistema se basa en un algoritmo agronómico desarrollado por PowerfulTree, que actúa como un "gemelo digital del viñedo", integrando todos estos datos para determinar la posición óptima de los paneles en cada momento. Este enfoque ha demostrado capacidad de mejora entre campañas, evidenciando un carácter adaptativo.

- **Agropolis (España)**

Se trata también de una estructura abierta, al tratarse de una instalación al aire libre diseñada para no interferir con la actividad agrícola. La disposición es de tipo *overhead*, con módulos elevados sobre postes de acero galvanizado que permiten el desarrollo del cultivo y el paso de maquinaria por debajo.

La instalación está formada por 150 módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, con recubrimiento antirreflectante, distribuidos en 10 filas organizadas en dos bloques con distintos niveles de transmitancia: uno con paneles opacos (5 % de paso de luz), y otro con paneles semitransparentes (40 %), donde la translucidez se logra mediante el espaciado entre células. Un tercer bloque sin estructura actúa como referencia en campo abierto.

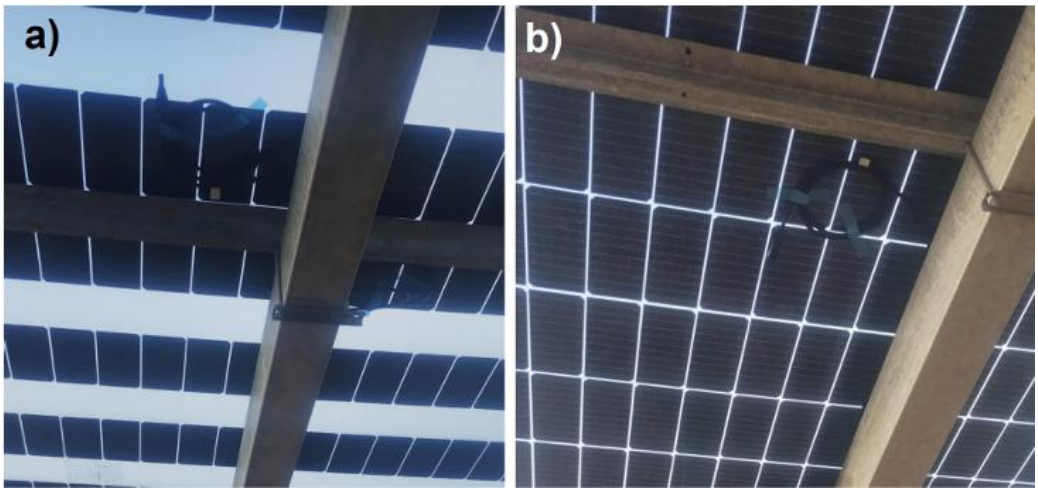


Ilustración 45. Disposiciones de paneles fotovoltaicos con diferentes niveles de transparencia. a) 40 % de transmitancia y b) 5 % de transmitancia

La superficie total del sistema es de aproximadamente 9.000 m^2, con una geometría diseñada para garantizar una distribución equilibrada de la radiación sobre los cultivos. Las filas de cultivo se orientan norte-sur, mientras que los paneles están montados sobre seguidores solares de un eje que ajustan su posición en dirección este-oeste.

La distancia entre filas varía según el tipo de módulo, siendo mayor en el bloque opaco (5,9 m) para permitir varias filas de cultivo entre estructuras, y menor en el bloque semitransparente (4,1 m). Este diseño garantiza la operatividad agrícola, permitiendo el uso del tractor para el mantenimiento del suelo, aunque el manejo del cultivo se realiza manualmente.

En cuanto a los módulos, se trata de tecnología monofacial de silicio cristalino, sin uso de sistemas de concentración. La instalación cuenta con una potencia total de 50,25 kWp, con una generación estimada de aproximadamente 400 kWh diarios.

En relación con la tecnología, el sistema incluye una infraestructura de monitorización muy completa, que incluye sensores de temperatura y humedad del aire, humedad y temperatura del suelo, sensores de radiación PAR y piranómetros, además de un robot móvil equipado con cámara RGB, sensor radiométrico y cámara térmica.



Ilustración 46. Sensórica y monitorización en la planta Agropolis. a) Medición de radiación PAR, b) monitorización del suelo a nivel de cultivo.

Los trackers se controlan mediante modelos matemáticos que integran condiciones meteorológicas y requerimientos lumínicos del cultivo, permitiendo ajustar dinámicamente la posición de los paneles.

- **Conthey (Suiza)**

El sistema se caracteriza por una estructura adaptable, ya que integra mallas y lonas desplegables que permiten ajustar el grado de cerramiento según las condiciones climáticas. La disposición es de tipo *overhead*, con los módulos instalados sobre los cultivos, sustituyendo las estructuras tradicionales de protección agrícola.

No se dispone de información específica sobre acceso a maquinaria, orientación o inclinación de los módulos. Sin embargo, el sistema destaca por su tecnología de microseguimiento óptico, que permite alternar entre dos modos de funcionamiento: uno orientado a maximizar la generación eléctrica y otro dirigido a optimizar la transmisión de luz hacia el cultivo. En las configuraciones más recientes, se combinan estructuras fijas y móviles para aumentar la flexibilidad del sistema.

Los módulos basados en la tecnología THEIA, combinan translucidez y alta eficiencia mediante un sistema de concentración óptica. Esta tecnología convierte al módulo en un elemento activo de gestión de la luz, funcionando de forma similar a una persiana inteligente. Están fabricados con silicio cristalino y alcanzan niveles de eficiencia elevados en ensayos de laboratorio. Sin embargo, no se dispone de datos específicos sobre su potencia unitaria, número de módulos o configuración detalla en el piloto inicial.



Ilustración 47. Instalación elevada con módulos THEIA

En la instalación más reciente (2025), el sistema alcanza una potencia de 242 kWp sobre 4.000 m^2, combinado paneles opacos y semitransparentes adaptados a las necesidades lumínicas de cada cultivo.

El sistema incorpora herramientas digitales de gestión como Insol'insights, que facilitan la toma decisiones agronómicas. Aunque no se detallan los sistemas de sensorización, el control de la instalación está orientado a optimizar las condiciones de cultivo, ajustando tanto la captación energética como los sistemas de protección climática, que pueden operar de forma manual o automática.

6.4.3. Producción agrícola y generación energética reportados

La agrivoltaica busca compatibilizar la producción agrícola con la generación de energía renovable en una misma superficie. Para analizar esto, la Tabla 5 recoge los resultados obtenidos por los proyectos seleccionados en ambas dimensiones, teniendo en cuenta variables como el microclima, la gestión hídrica, la calidad del cultivo, la resiliencia frente a eventos climáticos, la productividad agrícola y la generación eléctrica. A partir de esta comparación, se puede evaluar el grado de sinergia alcanzado entre ambas actividades y analizar en qué condiciones la combinación de producción agrícola y energética resulta más favorable.

Tabla 5. Producción agrícola y energética de los proyectos seleccionados.

Variables		Nidolères	Heggelbach	San Gabriel	Agropolis	Conthey
Efectos	Sombreado y Microclima	Modera temperatura	Disminuye PAR	Reduce temperatura del suelo y plantas	No reportada	Modera temperatura y protege frente a clima adverso
	Agua	Reduce evapotranspiración	Aumenta humedad del suelo en sequía	Reduce evapotranspiración	Sin datos directos (solo materia seca)	Reducción no cuantificada
	Calidad del cultivo	Menor grado alcohólico, mejor acidez	Aumenta rendimiento	Mejor pH / acidez, retraso vendimia 8 días	Lechuga sin diferencias; brócoli afectado en otoño	Sin diferencias significativas
	Resiliencia climática	Reducción de daños por calor (5 veces menos que en testigo)	Mayor resiliencia en años secos	Menor estrés térmico	No reportado	Mayor resiliencia
Productividad agrícola	Rendimiento	+10% a +45% según variedad	>80 % del convencional	195,0 kg/año; retraso de 8 días	Sin diferencias significativas (excepto brócoli)	Sin diferencias significativas
	LER	No reportado	160% (2017), 186% (2018)	No reportado	No reportado	No reportado
Producción energética	Producción energética	No reportado[12]	0,249 MWh/año	43 MWh/año	~146 MWh/año	300 MWh/año (previsto)
	Producción especifica	No reportado	1.266 - 1.285,3 kWh/kWp	1.654 kWh/kWp	2.905 kWh/kWp	1.240 kWh/kWp

[12] La información reportada para el caso indica que la producción aproximada de la planta equivale al consumo de 642 hogares.

- **Nidolères (Francia)**

El sistema presenta resultados positivos tanto en el microclima como en la producción agrícola.

En relación con el microclima, se ha observado un aumento de aproximadamente 2ºC bajo los paneles, lo que resulta suficiente para proteger las viñas frente a episodios de heladas. Además, el sistema contribuye a mejorar la gestión hídrica: el consumo de riego se reduce entre un 30 % y un 60 %, mientras que la evaporación disminuye alrededor del 25 %. Estas condiciones permiten mantener las hojas hasta 5 ºC más frescas, favoreciendo la protección de los brotes y estabilizando el desarrollo vegetativo.

En cuanto a la calidad del cultivo, los estudios muestran una mejora significativa en el perfil del vino, con menor grado alcohólico y mejor conservación de la acidez, así como perfiles organolépticos más equilibrados en comparación con las parcelas testigo. La vendimia de 2021 destacó especialmente por su alta calidad, alineándose con uno de los principales objetivos de la finca: contrarrestar los efectos del adelanto de la maduración y el aumento del azúcar en la uva.

Respecto a la resiliencia climática, el sistema reduce notablemente los daños asociados a olas de calor, con solo un 8 % de afección en la parcela protegida frente al 40 % en la parcela testigo.

En términos de productividad agrícola, se registran incrementos en el rendimiento según la variedad: +10 % en Chardonnay, +25 % en Marselan y +45 % en Grenache blanc. No obstante, no se dispone de datos sobre el indicador LER.



Ilustración 48. Recogida de uva en la planta de Nidolères

Desde el punto de vista energético, no se han reportado datos específicos de producción en kWh ni de producción especifica (kWh/kWp). Sin embargo, la potencia instalada de 2,1 MWc se estima equivalente al consumo eléctrico anual de 642 hogares.

- **Heggelbach (Alemania)**

El sistema tiene un impacto notable en el microclima del cultivo, principalmente mediante una reducción de la radiación fotosintéticamente activa del 30 % de media, lo que contribuye a moderar las temperaturas del suelo en periodos cálidos sin alterar significativamente la temperatura del aire.

En términos hídricos, el sistema favorece la conservación de la humedad del suelo, especialmente en condiciones de sequía. Durante el verano de 2018, caracterizado por altas temperaturas y baja precipitación, los cultivos bajo la instalación mostraron un mejor comportamiento, evidenciando una mayor resiliencia frente al estrés hídrico.

Si se analiza la productividad agrícola, los resultados varían según el cultivo y el año, pero se mantienen generalmente por encima del 80 % del rendimiento de referencia, umbral considerado comercialmente viable. En años especialmente secos, como 2018, algunos cultivos llegan incluso a superar los rendimientos del control, lo que pone de manifiesto el efecto estabilizador del sistema.

La eficiencia en el uso del suelo alcanza valores elevados, con un LER del 160 % en 2017 y del 186 % en 2018, lo que confirma la capacidad del sistema para generar más valor combinado (agrícola + energético) que los usos separados del suelo.

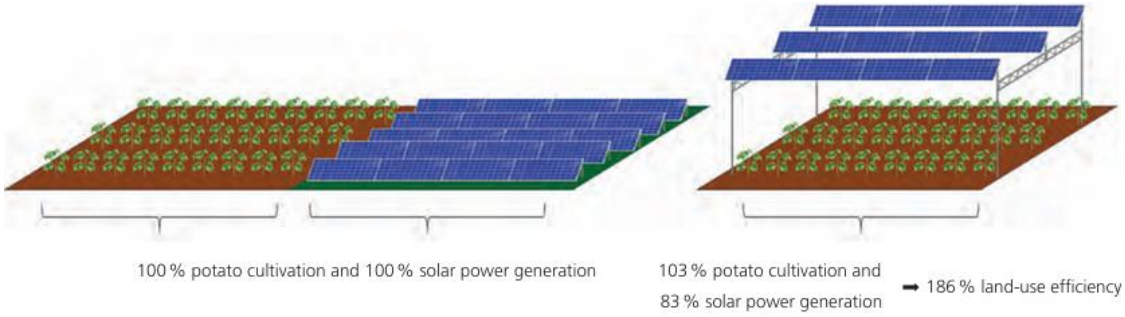


Ilustración 49. Uso doble del suelo para agricultura y cultivo de patatas.

A nivel energético, la instalación produce aproximadamente 249.857 kWh anuales, con una producción específica de entre 1.266 y 1.285 kWh/kWp, valores significativamente superiores a la media alemana. Este alto rendimiento se atribuye tanto a las condiciones de radiación como al uso de módulos bifaciales.

- **San Gabriel (España)**

Los resultados obtenidos indican efectos relevantes en la regulación del microclima, especialmente en condiciones de estrés térmico. Durante la campaña de 2025, se registraron descensos de hasta 6 ºC en el suelo y 3,8 ºC en la superficie vegetal, lo que evidencia la capacidad del sistema para mitigar el exceso de calor. Se registró también un descenso medio de 1,33 ºC en la temperatura foliar.

En relación con el agua, se observa una reducción de la evapotranspiración del 21 % en 2024 y del 15 % en 2025, junto con una mejora del potencial matricial del suelo (hasta 257 kPa de diferencia respecto al testigo, lo que indica una mayor disponibilidad hídrica bajo la instalación.

En cuanto a la calidad del cultivo, el sistema permite mantener o mejorar parámetros enológicos clave. Se observa una reducción del grado Brix de entre 1,9 y 2,5 puntos, un mejor equilibrio ácido y niveles de antocianos similares al testigo, pero alcanzados bajo condiciones de menor

estrés térmico. Además, el sistema permite retrasar la vendimia entre 8 días y hasta dos semanas, lo que amplía significativamente la capacidad de decisión sobre el momento óptimo de cosecha.

Respecto a la productividad agrícola, no se reportan valores directos de rendimiento en la fuente más reciente, aunque sí se confirma la estabilidad del cultivo en términos cualitativos. El indicador LER no ha sido calculado.

En el ámbito energético, la instalación cuenta con una potencia instalada de 26 kWp, y genera aproximadamente 43 MWh/año. Además, se indica que la reducción de producción energética asociada al ajuste de sombreado es menor de la prevista inicialmente.



Ilustración 50. Cultivo bajo paneles en agrivoltaica San Gabriel

- **Agropolis (España)**

Los resultados del primer año muestran efectos relevantes en el comportamiento de los cultivos, aunque con un enfoque centrado en la comparación agronómica más que en la optimización productiva.

En términos de microclima y agua, el sistema dispone de una amplia red de sensores, pero los datos específicos de correlación entre condiciones microclimáticas y rendimientos se identifican como línea de futura investigación, por lo que no se presentan resultados concluyentes en este ámbito. Los datos de contenido hídrico no se reportan directamente, aunque se analizan variables relacionada como la materia seca.

En cuanto a la calidad del cultivo, los resultados indican que las características comerciales de la lechuga (altura, diámetro, biomasa e índice de compacidad) no se ven negativamente afectadas por la presencia de los paneles, ya que las diferencias observadas durante el desarrollo del cultivo tienden a desaparecer al final del ciclo.

A nivel de productividad, la lechuga muestra comportamientos similares en los tres tratamientos, sin diferencias significativas en peso fresco en la mayoría de los casos. Sin embargo, el brócoli presenta una respuesta distinta, con una reducción significativa de biomasa bajo los paneles en el ciclo de otoño, lo que indica una mayor sensibilidad a la reducción de radiación en condiciones de menor disponibilidad lumínica.

En relación con la producción energética, la instalación genera aproximadamente 400 kWh diarios, lo que, en relación con la potencia instalada, supone una producción consistente para un sistema experimental, aunque no se proporciona el valor de producción específica.



Ilustración 51. Cultivo de cultivos en Agropolis. a) Diagramas experimentales aleatorios; b) Primer plano de la lechuga; c) Primer plano del cultivo de brócoli.

- **Conthey (Suiza)**

Los resultados del proyecto muestran efectos positivos en la regulación del microclima, aunque con un nivel de detalle limitado. El sistema permite reducir el impacto de las altas temperaturas y mitigar los efectos de las olas de calor, además de proporcionar protección frente a fenómenos adversos como granizo, lluvia intensa o heladas, mediante el uso de mallas o lonas desplegables.

A nivel de consumo del agua, se observa una reducción asociada a una menor evapotranspiración bajo la cubierta, aunque no se aportan valores cuantitativos.

Atendiendo a la calidad del cultivo, los ensayos realizados con frambuesas no muestran diferencias estadísticamente significativas en parámetros como el contenido de azúcar o peso del fruto en comparación con sistemas convencionales, como se ve en la Ilustración 52. Esto sugiere que el sistema mantiene la calidad productiva existente.

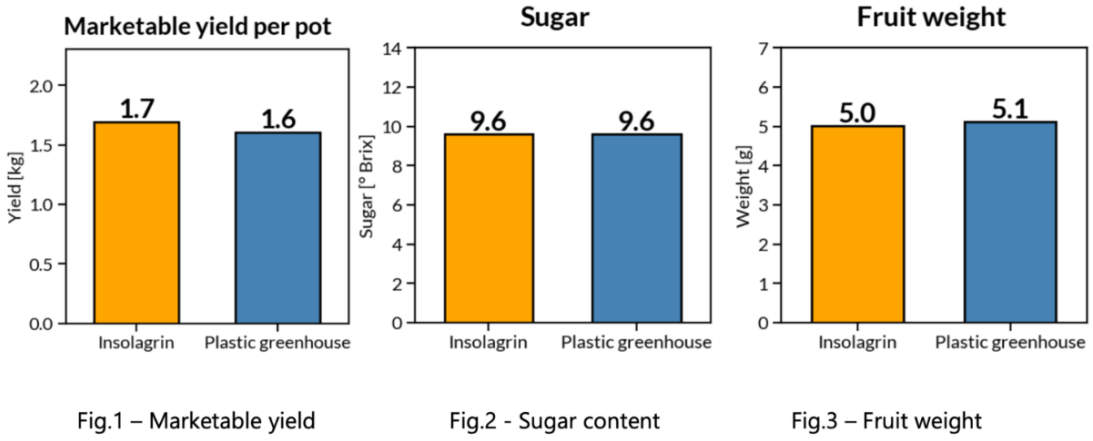


Ilustración 52. Productividad agrícola respecto al cultivo bajo plástico.

En cuanto a la productividad agrícola, tampoco se observan diferencias significativas en el rendimiento comerciable respecto al cultivo bajo plástico. No obstante, algunas cifras presentes en las fuentes corresponden a proyecciones, por lo que no deben considerarse como resultados experimentales. El indicador LER no ha sido reportado.

En el contexto energético, la instalación piloto generó aproximadamente 10,5 MWh entre 2021 y 2023. En la fase más reciente, la instalación sobre frutales presenta una producción estimada de 300 MWh anuales, aunque este valor es una previsión. No se dispone de datos sobre la producción específica (kWh/kWp).

6.4.4. Factores económicos

La viabilidad económica es uno de los factores clave para la implantación y escalabilidad de los sistemas agrivoltaicos. En la Tabla 6 se muestra la información disponible sobre inversiones realizadas, fuentes de financiación, modelos de ingresos y resultados económicos asociados a cada proyecto. A partir de estas variables, se pueden identificar los factores que favorecen la rentabilidad de las instalaciones, así como las barreras económicas que todavía limitan su desarrollo.

Tabla 6. Impacto económico de los proyectos seleccionados.

Variables	Nidolères	Heggelbach	San Gabriel	Agropolis	Conthey
Inversión	+3,86 M€	No reportada	100.000-500.000€	No reportada	No especifica (proyecto). A nivel corporativo: Serie A CHF 5 M€ + H2020 HIPERION 10,6M€
Financiación	Mixta pública (Occitania) + Privada (Sun'R)	Pública (BMBF) + Privada	Publica (MAPA 20% y FEADER 80%)	Pública (Horizonte Europa)	Pública (OFEN/SFOE) + Privada (Romande Energie)
Fuentes de ingresos	Venta electricidad Aumento valor del vino	Autoconsumo Venta electricidad	No reportada	No reportada	Venta electricidad Producción agrícola
Rentabilidad	No reportada	No reportada	No reportada	No reportada	No reportada

- **Nidolères (Francia)**

La inversión total del proyecto supera los 3,86 millones de euros. Su financiación combina recursos privados y públicos. Por un lado, Sun'R Investissement aporta capital a través de deuda y fondos propios; por otro, el proyecto ha recibido respaldo institucional mediante una subvención de 200.000 € y un anticipo reembolsable de 450.000 € concedidos por la región de Occitania.

El modelo de ingresos se basa en dos fuentes. La venta de electricidad, facilitada por su participación en la convocatoria de la CRE (Commission de Régulation de l'Énergie); y por otro, la actividad agrícola, que se benefician de una mayor calidad del vino, cuyo valor se espera incrementar de forma significativa. No obstante, no hay información sobre la rentabilidad económica del proyecto.

- **Heggelbach (Alemania)**

No hay una cifra específica de inversión para la instalación, debido a su carácter de proyecto de investigación aplicada. La financiación se basa en un modelo mixto, combinando fondos públicos del programa alema FONA (BMBF) con participación de socios industriales.

Los ingresos se obtienen en torno a dos fuentes principales: el autoconsumo energético de la explotación, que alcanza aproximadamente el 40 % pudiendo llegar el 70 % mediante almacenamiento en batería de 150 kWh, y la venta del excedente energético a la red, gestionada por Elektrizitätswerke Schönau, además de los beneficios aportados de la producción agrícola.

Este modelo permite reducir la dependencia energética de la explotación y diversificar los ingresos. Sin embargo, el proyecto identifica limitaciones económicas relacionadas con el marco regulatorio existente en el momento de su implementación, como la falta de reconocimiento específico de la agrivoltaica y la exclusión de determinados incentivos agrícolas

- **San Gabriel (España)**

La financiación del proyecto es principalmente pública, dentro del Grupo Operativo AGROVITIVOLTAICA, con una ayuda total de 567.910,37 €, cofinanciada en un 20 % por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) y un 80 % por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER).

La inversión estimada del proyecto se sitúa entre 100.000 y 500.000 €, aunque no se dispone de un desglose detallado de costes. El modelo económico combina generación energética y mejora de la calidad del producto agrícola, aunque no se aportan datos cuantitativos de ingresos ni de rentabilidad.

En este contexto, el proyecto se plantea como una fase demostrativa, donde la viabilidad económica a escala comercial aún no está comprobada.

- **Agropolis (España)**

El proyecto no presenta datos específicos sobre inversión, costes, ingresos o rentabilidad, debido que es un proyecto de investigación aplicada.

La financiación proviene en su totalidad de fondos europeos, en concreto del programa Horizonte Europa, dentro de un consorcio de investigación (proyecto Symbiosyst). De este modo, el valor principal del sistema no se basa en su viabilidad económica inmediata, sino en la generación de evidencia científica que permita diseñar futuras aplicaciones comerciales.

Este implica que los resultados deben interpretarse como base experimental para el desarrollo de soluciones agrivoltaicas más optimizadas desde el punto de vista técnico y económico.

- **Conthey (Suiza)**

No hay información concreta sobre la inversión especifica del proyecto en Conthey. Sin embargo, a nivel corporativo, Insolight ha recibido financiación relevante, incluyendo capital privado y participación en proyectos europeos de I + D. A nivel corporativo: ronda Serie A de CHF 5 M€ para comercializar los primeros 1.000 módulos; proyecto H2020 HIPERION de 10,6 M€ en consorcio para línea de montaje piloto

El modelo de financiación es mixto, combinando apoyo público, a través del programa de proyectos piloto de la Oficina Federal de Energía Suiza (OFEN/SFOE), con inversión privada,

principalmente de Romande Energie, que adquiere y opera las instalaciones en fases más avanzadas.

El modelo económico se basa en la doble producción. Por un lado, la electricidad generada se comercializa, en el caso de la instalación más reciente a Denner (grupo Migros). Por otro, se mantienen los ingresos agrícolas, aunque no se aportan datos económicos detallados.

No se dispone de información cuantificada sobre la rentabilidad, más allá de estimaciones prospectivas que sugieren un posible beneficio económico a largo plazo. Como elemento adicional, la sustitución de túneles de plástico por la infraestructura agrivoltaica puede suponer un ahorro implícito, reduciendo parcialmente el coste adicional del sistema.

6.4.5. Marco regulatorio y factores sociales

Además de los aspectos técnicos y económicos, el éxito de un proyecto agrivoltaico depende en gran parte de su aceptación social y la normativa que regula su desarrollo. La Tabla 7 presenta los principales factores sociales y normativos identificados en los casos analizados, incluyendo aspectos como la percepción paisajística, la participación de los actores locales, los modelos de propiedad, la distribución de beneficios y el acceso a incentivos públicos.

Tabla 7. Factores sociales y regulatorios de los sistemas seleccionados.

Variables		Nidolères	Heggelbach	San Gabriel	Agropolis	Conthey
Aceptación social	Afectación del paisaje	No reportada	Visiones contrapuestas	No reportada	No reportada	No reportada
	Participación comunitaria en la toma de decisiones	No reportada	Múltiples actores	Colaboración técnica multi-actor	Colaboración académica-industria	No reportada
	Modelo de propiedad	Mixta: familiar (viñedo) + promotora (instalación fotovoltaica)	Mixto (múltiples actores)	No reportado	Universidad (UPC)	Empresa (Romande Energie)
	Distribución beneficios	Reparto contractual	Reparto autoconsumo/ excedente	No reportada	No reportada	No reportada
	Acceso a incentivos públicos	CRE, ayudas regionales, Prix 2023	FONA (BMBF)	MAPA + FEADER	Horizonte Europa	OFEN/ SFOE
Marco regulatorio	Normativa de Referencia	ADEME, APER	DIN SPEC 91434	Sin regulación nacional específica	Instrucción técnica de agrovoltaismo	No reportada
	Protección ambiental y fauna	No aplica	No aplica	No aplica	Zona ZEPA	No aplica

- **Nidolères (Francia)**

En relación a los factores sociales no se han reportado conflictos relevantes en cuanto a la percepción del paisaje. Por el contrario, la aceptación del sistema por parte del ámbito agrícola es elevada, reflejando una implicación directa de la familia Escudié, tanto en la decisión de instalar el sistema como en su gestión a lo largo del tiempo. No obstante, no hay información detallada sobre la participación comunitaria en el diseño del proyecto.

El modelo de propiedad sigue una estructura dual: el Domaine de Nidolères mantiene la propiedad del terreno y la explotación agrícola, mientras que Sun'R Investissement es propietario de los activos fotovoltaicos. La gestión técnica del sistema recae en Sun'Agri. En este contexto, los beneficios se distribuyen entre las distintas partes según acuerdos contractuales establecidos.

El proyecto ha tenido acceso a incentivos públicos, incluyendo su elección en la convocatoria de la CRE en diciembre de 2015, así como apoyo mediante ayudas regionales. Además, ha sido reconocido con el Prix National de la Dynamique Agricole 2023 en la categoría de innovación.

En términos regulatorios, el proyecto obtuvo el permiso de construcción en octubre de 2014, iniciándose las obras en 2018. La primera vendimia bajo condiciones agrivoltaicas se produjo en septiembre de 2021.

- **Heggelbach (Alemania)**

El proyecto se caracteriza por un modelo de gobernanza multi-actor y colaborativo, que integra la explotación agrícola, el operador energético y el equipo científico. La estructura de propiedad se basa en un sistema de responsabilidades compartidas, lo que facilita la replicabilidad en contextos similares.

Desde el punto de vista social, la percepción del sistema es mixta. Mientras que algunos actores lo perciben como una estructura visualmente intrusiva, otros destacan su integración paisajística tras su observación directa.

Durante su desarrollo se incluyó un alto grado de participación comunitaria, con talleres y consultas a la población local, lo que refuerza la legitimidad social del proyecto.

En el ámbito regulatorio, el sistema se desarrolló en un contexto previo al reconocimiento formal de la agrivoltaica en Alemania, lo que supuso limitaciones importantes, como la pérdida de subvenciones agrícolas y la ausencia de incentivos energéticos específicos. No obstante, reformas regulatorias posteriores han comenzado a reconocer este tipo de sistemas.

El proyecto representa un caso destacado de integración agrivoltaica en explotación real, con alta replicabilidad en sistemas agrícolas extensivos, aunque condicionado por el marco regulatorio y la aceptación social.

- **San Gabriel (España)**

El proyecto se desarrolla dentro de una gobernanza colaborativa compleja, que integra perfiles tecnológicos, agrícolas, energéticos, académicos e institucionales. Esta estructura refuerza su credibilidad y su potencial de transferencia.

En términos sociales, no se dispone de información específica sobre la percepción del paisaje, aunque sí se identifica un reto significativo en la aceptación social, debido al desconocimiento general sobre la agrivoltaica y a la existencia de proyectos percibidos como *greenwashing* que distorsionan la imagen del sector.

El modelo de propiedad y la distribución de beneficios no están detallados, aunque el sistema se desarrolla en un marco experimental con fuerte presencia de financiación pública,

En cuanto al marco regulatorio, se identifica como principal barrera la ausencia de una regulación específica para la agrivoltaica en España, lo que genera incertidumbre jurídica y dificulta la escalabilidad del modelo. El proyecto opera dentro del Programa de Desarrollo Rural, lo que facilita el acceso a financiación, pero no implica un reconocimiento normativo específico.

Las barreras identificadas son de carácter regulatorio, técnico y social, lo que sitúa al proyecto en una fase incipiente, donde su consolidación dependerá del desarrollo de un marco normativo adecuado y de una mayor difusión y comprensión de la tecnología.

- **Agropolis (España)**

En el ámbito social, no se dispone de información específica sobre percepción del paisaje o participación comunitaria, lo cual es coherente con su naturaleza experimental y su localización en un entorno académico.

El modelo de propiedad es universitario, lo que simplifica la gestión del proyecto, pero limita la extrapolación directa a explotaciones agrícolas reales, donde intervienen múltiples actores e interés económicos.

Desde el punto de vista regulatorio, el proyecto se desarrolla en ausencia de un marco específico para la agrivoltaica en España, situación compartida con otros casos nacionales. Sin embargo, presenta una particularidad relevante: la instalación se ubica en una Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA), lo que ha obligado a implementar medidas específicas de protección de fauna, como vallado eléctrico, redes anti-aves y sistemas disuasorios acústicos.

Esta condición añade una dimensión adicional de análisis, vinculada a la compatibilidad entre agrivoltaica y conservación ambiental, aspecto especialmente importante en territorios con restricciones ecológicas.

La financiación europea proporciona legitimidad institucional y visibilidad al proyecto, aunque no constituye un modelo replicable directamente para promotores privados, al no existir aún un sistema consolidado de incentivos para este tipo de instalaciones.

- **Conthey (Suiza)**

En relación con los factores sociales, no se dispone de información específica sobre la percepción del paisaje ni sobre la participación comunitaria en el diseño del proyecto.

El modelo de propiedad y gobernanza se basa en la colaboración estructurada entre los distintos actores: Romande Energie como propietaria y operador energético, Insolight como proveedor tecnológico y Agroscope como entidad de investigación. La electricidad generada se vende a terceros, aunque no se detalla la distribución de beneficios asociados a la producción agrícola.

El proyecto recibe apoyo público, a través del programa suizo de proyectos piloto y de demostración, lo que refuerza su carácter experimental y su visibilidad institucional.

En cuanto al marco regulatorio, no se especifican normativas concretas ni procesos de autorización, lo que refleja un entorno aún en desarrollo para este tipo de soluciones. No obstante, el proyecto se alinea con la estrategia energética suiza orientada a la descarbonización, que impulsa el crecimiento de la energía solar sin aumentar la ocupación del suelo agrícola.

6.4.6. Transferibilidad a Euskadi

A partir de los casos analizados, se aborda la posible aplicación de modelos agrivoltaicos en Euskadi, considerando sus particularidades climáticas, agrarias y territoriales. Este análisis permite identificar qué soluciones pueden adaptarse al contexto local, así como las principales oportunidades y limitaciones para su desarrollo.

La Tabla 8 recoge los cinco proyectos analizados y su evaluación en función de las cuatro condiciones específicas desarrolladas en el apartado 6.1.2. Para cada proyecto, se indica su grado de adecuación a Euskadi en relación con cada variable: apto (el modelo encaja adecuadamente

con el contexto vasco y podría aplicarse de forma directa), compatible (el proyecto puede adaptarse, aunque requiere ciertos ajustes) y limitado (indica la existencia de barreras que dificultan su implementación).

Tabla 8. Transferibilidad de los proyectos seleccionados a Euskadi.

Variable	Nidolères	Heggelbach	San Gabriel	Agropolis	Conthey
Recurso solar y clima	Limitado	Apto	Limitado	Limitado	Compatible
Estructura agraria y uso del suelo	Limitado	Apto	Compatible	Compatible	Limitado
Orografía y disponibilidad de suelo	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible	Apto
Marco de política energética y regulatorio	Limitado	Limitado	Limitado	Compatible	Limitado

- **Caso 1 (Nidolères, Francia)**

El proyecto de Nidolères se desarrolla sobre viñedo, un cultivo con cierta presencia en Álava, especialmente en Rioja Alavesa. El motivo por el que se instala el sistema en Francia no se corresponde con el problema principal que enfrentaría un viñedo en Euskadi, donde la limitación habitual no es el exceso sino el déficit de radiación y la dificultad de alcanzar una maduración completa en años fríos o muy lluviosos. Esto significa que, aunque la tecnología de persianas dinámicas controladas por sensores podría replicarse técnicamente, su lógica de funcionamiento tendría que invertirse: en lugar de sombrear para proteger del calor, el sistema debería minimizar el sombreado y maximizar la transmisión de radiación directa, reduciendo sensiblemente el margen de generación eléctrica aprovechable. A esto se añade que la inversión del proyecto es difícil de asumir para la pequeña explotación familiar característica del caserío vasco, a excepción de que se impulsara mediante fórmulas de propiedad compartida similares a las empleadas en Francia entre el promotor energético y la familia propietaria. Nidolères ofrece un modelo de gobernanza económica replicable más que una solución agronómica directamente aplicable.

- **Caso 2 (Heggelbach, Alemania)**

Heggelbach es probablemente el caso que presenta mayor afinidad climática con Euskadi. Ambos territorios comparten un clima templado-húmedo, con nubosidad relevante y una proporción significativa de radiación difusa. Debido a estas condiciones, el sistema alemán hace uso de módulos bifaciales fijos optimizados para aprovechar la luz reflejada y dispersa más que la radiación directa. La rotación de cultivos empleada en el proyecto es también asimilable a los cultivos herbáceos y de secano predominantes en la Llanada Alavesa. Por otra parte, al ser una explotación agrícola real de gran tamaño, y no una parcela experimental, refuerza su valor como modelo de escalabilidad. La principal dificultad de transferencia no es técnica ni agronómica, sino regulatoria. El proyecto alemán solo alcanzó viabilidad plena tras el reconocimiento normativo de la agrivoltaica en la Ley de Energías Renovables alemana, un marco que en Euskadi todavía no existe. Sin una figura equivalente que reconozca la actividad agrícola bajo los paneles y permita acceso a primas o subvenciones específicas, la réplica de este modelo en territorio vasco tendría que apoyarse inicialmente en fondos de investigación o programas piloto, más que en un marco de explotación comercial consolidado.

- **Caso 3 (San Gabriel, España)**

El caso de San Gabriel no solo comparte la proximidad con la Rioja Alavesa, sino que también el marco institucional español. El sistema basado en cuatro trackers de un eje gestionados mediante un algoritmo agronómico que ajusta la radiación incidente en función de variables microclimáticas, resulta atractivo gracias a su capacidad de adaptación dinámica. Un sistema de este tipo podría calibrarse para favorecer la captación de luz en condiciones de baja radiación en lugar de limitarla. Sin embargo, la finalidad de este proyecto es proteger frente a un exceso de calor y retrasar la maduración, mientras que en el contexto vasco el objetivo sería el contrario. La escala reducida del proyecto y su financiación, hacen que este modelo sea más transferible como esquema de financiación para un proyecto piloto en viñedo alavés que como solución de despliegue comercial inmediato. La incertidumbre regulatoria señalada por los propios promotores del proyecto afecta igualmente a cualquier réplica en Euskadi.

- **Caso 4 (Agropolis, España)**

Por un lado, Agropolis es un proyecto orientado al conocimiento sobre el comportamiento de distintos niveles de transmitancia sobre cultivos hortícolas. Esto es útil para adaptar el diseño agrivoltaico a contextos locales. Sin embargo, dado que la reducción de biomasa se debe a una menor radiación, el territorio de Euskadi es una limitación debido a su ya reducida disponibilidad lumínica.

Pero, por otro lado, el hecho de que la instalación se ubique en una Zona de Especial Protección para las Aves es relevante para Euskadi, ya que lo ha obligado a incorporar medidas de protección de fauna. Esto resulta directamente aplicable como precedente de gestión ambiental, independientemente del cultivo concreto.

- **Caso 5 (Insolight, Suiza)**

El proyecto de Conthey presenta ciertas similitudes con el contexto vasco en términos climáticos y topográficos. Ambos son países de relieve montañoso y escasa superficie llana disponible. La solución propuesta en el proyecto podría ser útil para Euskadi porque no compite por nuevo suelo agrícola, sino que reemplaza infraestructuras de protección ya existentes en explotaciones de fruticultura y berries, un sector con cierta tradición en Bizkaia y Gipuzkoa. Sin embargo, la complejidad tecnológica del sistema implicaría unos requerimientos de inversión y de conocimiento técnico que difícilmente podrían asumir pequeñas explotaciones familiares vascas sin la intervención de un operador energético de la escala de Romande Energie. Por ello, este sistema se posiciona como una tecnología de futuro en lugar de una solución inmediatamente replicable.

Los casos analizados muestran que la transferibilidad de la agrivoltaica al contexto de Euskadi depende menos de la viabilidad técnica de los sistemas y más de su adecuación funcional a las condiciones locales. Los modelos desarrollados en climas con alta radiación tienden a presentar un desajuste en sus objetivos agronómicos, mientras que aquellos diseñados para condiciones de radiación moderada o difusa muestran una mayor afinidad. Asimismo, factores estructurales como el tamaño de las explotaciones, la disponibilidad de suelo y la ausencia de un marco regulatorio específico, condicionan de manera decisiva su implantación.

6.4.7. Análisis en conjunto

Tras el análisis individualizado de los cinco proyectos, es adecuado extraer las regularidades y divergencias que se observan, además de valorar cuáles pueden ser trasladados al contexto de Euskadi. Todos ellos tienen en común que la agrivoltaica se plantea como una capa tecnológica que refuerza la actividad agrícola y no una sustitución de esta.

Desde el punto de vista tipológico, se confirma que la configuración *overhead* dinámica es la tendencia dominante en los proyectos demostrativos europeos más recientes, frente a la opción fija más simple. El sector se desplaza desde la maximización del rendimiento energético con paneles fijos hacia el control dinámico que permite gestionar la radiación incidente como herramienta agronómica con el fin de compartir dicho recurso entre planta y panel. El único caso en el que se puede prescindir del seguimiento solar es el caso de Heggelbach, con cultivos extensivos poco sensibles a variaciones de sombreado y cuya geometría estructural garantiza radiación suficiente sin necesidad de control activo. Esto indica que la complejidad tecnológica de un sistema agrivoltaico no depende tanto del país de origen como del cultivo bajo los paneles: los cultivos de alto valor añadido y mayor sensibilidad fenológica requieren sistemas dinámicos y costosos, mientras que los cultivos extensivos de bajo valor unitario se adaptan mejor a soluciones fijas y económicamente más accesibles.

En cuanto a los resultados agrícolas y energéticos, los efectos sobre el microclima son consistentes en toda la muestra: reducción de temperatura, mejora de la disponibilidad hídrica y, en menor medida, protección frente a eventos extremos; confirmando así lo descrito en el marco teórico del apartado 5.2. Se observa una dualidad en la productividad agrícola. El mismo diseño tecnológico que resulta beneficioso en climas mediterráneos o continentales puede resultar contraproducente en un territorio donde la radiación ya es limitada, lo que obliga a replantear la lógica de diseño del sistema antes de transferir estos modelos a otros territorios. En la mayoría de los casos, el rendimiento y calidad se mantiene o mejora con la excepción del brócoli en el caso de Agropolis, en el que el cultivo ya opera cerca de su umbral de saturación lumínica inferior.

En el plano económico, se evidencia una correlación clara entre el grado de desarrollo normativo del país y la disponibilidad de información financiera. En Alemania, Francia y Suiza, existe una trayectoria reguladora o institucional, junto con instrumentos específicos de retribución a la energía agrivoltaica. Mientras que, en España, la ausencia de un marco normativo específico hace que los proyectos se mantengan en una fase experimental, dependiente de fondos públicos sin evidencia de viabilidad comercial autónoma. Por ello, cualquier proyecto agrivoltaico que se plantee en el corto plazo en territorio vasco, deberá apoyarse en fórmulas de financiación pública o de investigación aplicada.

Respecto a los factores sociales y regulatorios, el rasgo más llamativo del conjunto es la ausencia de un reconocimiento normativo específico para la agrivoltaica como uso dual del suelo, salvo en Alemania. Este hecho condiciona de forma transversal la escalabilidad de los proyectos y resulta coherente con el vacío normativo descrito en el apartado 5.3.4.1 para el conjunto de Europa. También puede observarse que los proyectos con mayor participación comunitaria o mayor diversidad de actores institucionales implicados, presentan una gobernanza más robusta, así como una mayor capacidad de adaptación a entornos regulatorios cambiantes. Por último, dejando de lado el marco regulatorio general, un matiz relevante que únicamente aparece en el caso de Agropolis es la necesidad de compatibilizar la instalación agrivoltaica con figuras de protección ambiental.

Recomendación para Euskadi

Del análisis conjunto se desprende que ningún caso de la muestra constituye un modelo directamente trasladable a Euskadi, aunque su lectura conjunta permite perfilar los rasgos que debería reunir un futuro proyecto piloto adaptado al territorio.

Lo más razonable sería apostar por configuraciones con módulos bifaciales fijos, sin seguimiento solar, dimensionados para aprovechar la radiación difusa propia del clima atlántico, en la línea con lo observado en Heggelbach. La adaptación requerida sería principalmente de diseño, priorizando geometrías abiertas, una baja intensidad de sombreado y orientaciones dirigidas a minimizar las pérdidas energéticas, en lugar de proteger el cultivo frente al exceso de calor, como ocurre en la mayoría de los casos analizados.

La elección del cultivo y la escala del proyecto debería ajustarse a la estructura agraria real del territorio. Prevalecerían aquellos cultivos en los que el sombreado resulte neutral o incluso beneficioso, y donde el valor añadido del producto justifique la inversión. Dado que la superficie agrícola se concentra mayoritariamente en la Llanada Alavesa, con predominio de cereal y secano, sería coherente orientar estos sistemas hacia cultivos extensivos o, en su caso, hacia el viñedo de Rioja Alavesa. En Bizkaia y Gipuzkoa, en cambio, los sistemas hortícolas y frutícolas de pequeña escala resultarían más adecuados a la estructura productiva existente.

La limitación orográfica del territorio vasco favorece, además, aquellas soluciones capaces de sustituir infraestructuras de protección agrícola ya existentes sin necesidad de ocupar nuevo terreno, como con el planteamiento de Conthey. Sin embargo, la complejidad tecnológica y el elevado coste de estos sistemas superan, por el momento, la capacidad de inversión de la pequeña explotación familiar predominante en Euskadi, lo que apunta a una solución de medio plazo.

A estas condiciones técnicas y económicas, se suma la ausencia de un marco regulatorio específico para la agrivoltaica en España, así como la necesidad de compatibilizar este tipo de instalaciones con figuras de protección ambiental y de fauna, lo que introduce condicionantes adicionales en su diseño e implantación.

7. Diagrama de Gantt

Se presenta el diagrama de Gantt que recoge la planificación del trabajo, distribuida en cinco fases a lo largo de los cuatro meses de ejecución del TFG, comprendidos entre marzo y junio de 2026.

	TAREA	SEMANAS	Marzo				Abril				Mayo				Junio			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
FASE 1	**Planificación y definición del trabajo**	2																
FASE 2	**Enfoque metodológico**	4																
T.2.1	Revisión bibliográfica y técnica	3																
T.2.2	Organizar referencias	2																
T.2.3	Elaboración del índice	1																
FASE 3	**Estado del arte**	6																
T.3.1	Redacción marco teórico	5																
T.3.2	Análisis de transferibilidad a Euskadi	1																
FASE 4	**Ánalisis de casos de estudio**	2																
T.4.1	Selección y justificación de casos	1																
T.4.2	Elaboración de la matriz comparativa	1																
T.4.3	Redacción de los casos	1																
FASE 5	**Redacción final y entrega**	2																
T.5.1.	Introducción y conclusiones	2																
T.5.2	Presupuesto y apartados formales	1																
T.5.3	Revisión, corrección y entrega	1																

8. Descripción del presupuesto del TFG

El presente apartado recoge una estimación del coste económico asociado al desarrollo de este TFG. Dado que el trabajo se ha basado exclusivamente en revisión bibliográfica, no se han generado costes derivados de trabajo experimental ni adquisición de materiales específicos. No obstante, con el fin de ofrecer una valoración económica realista del esfuerzo invertido, se han considerado cuatro categorías de gasto:

- **Coste de personal**: horas dedicadas al trabajo por la autora y el tutor.
- **Amortización del equipamiento**: fracción del coste del equipo informático proporcional al tiempo de uso durante el TFG.
- **Material consumible**: recurso de uso puntual y no reutilizable.
- **Costes indirectos**: reserva destinada a cubrir gastos imprevistos o no contemplados que puedan surgir durante el desarrollo de trabajo.

Los valores indicados responden a tarifas de mercado para el perfil de investigador junio y a criterios estándar de amortización proporcional al tiempo de uso.

Coste de personal			
Concepto	Horas	€/hora	Coste (€)
Estudiante (investigador junior)	150	15	2.250 €
Tutorización	10	25	250 €
Subtotal			2.500 €

Tabla 9. Costes de personal

Coste de equipamiento				
Equipo	Coste (€)	Vida útil (años)	Tiempo uso (horas)	Amortización (€)
Ordenador	1.000	5	150	3,43 €
Subtotal				3,43 €

Tabla 10. Costes de equipamiento (amortización)

Material consumible	
Concepto	Coste estimado (€)
Licencia Microsoft Office	40 €
Acceso bibliográfico	150 €
Material de escritorio	10 €
Subtotal	200 €

Tabla 11. Material consumible

Presupuesto completo	
Personal	2.500 €
Equipamiento	3.43 €
Materiales	200 €
Subtotal	2.703,43 €
Imprevistos (5%)	135,17 €
Total	2.838,6 €

Tabla 12. Presupuesto

9. Conclusiones

El presente trabajo ha permitido profundizar en el potencial de la agrivoltaica como una posible solución capaz de responder a uno de los grandes desafíos de la actualidad: compatibilizar la transición energética con la preservación de la actividad agraria. A través del análisis y la comparación de los casos estudiados, se ha podido observar que la agrivoltaica no solo mejora la eficiencia del uso del suelo, sino que ofrece también ventajas significativas para la actividad agraria, el medio ambiente y el desarrollo socioeconómico de los territorios donde se implanta.

Las experiencias europeas analizadas demuestran, sin embargo, que la agrivoltaica no constituye una solución universal aplicable de manera homogénea, sino un conjunto de soluciones que deben adaptarse a las características de cada territorio. Factores como el clima, el tipo de cultivo o el marco regulatorio condicionan de manera decisiva la viabilidad de los proyectos. En este sentido, el diseño técnico suele responder más a las necesidades agronómicas específicas del cultivo que a la búsqueda de maximizar la producción de energía.

Respecto al caso particular de Euskadi, aunque existen modelos europeos que han demostrado ser exitosos, su transferencia al territorio vasco no puede realizarse de manera directa, sino que requiere una adaptación cuidadosa a sus condiciones agroclimáticas y a una estructura agraria fragmentada y de pequeña escala. Estas características plantean al mismo tiempo limitaciones y oportunidades que es necesario considerar en el diseño de futuros sistemas. El interés de la agrivoltaica no radica tanto en resolver una competencia por el suelo, sino en ofrecer una alternativa que permita integrar la transición energética dentro de un modelo agrario de pequeña escala, evitando que este quede al margen del despliegue fotovoltaico convencional.

La viabilidad de los proyectos piloto dependerá en gran medida de factores externos a la propia tecnología. Por un lado, la existencia de financiación pública o de apoyo a la investigación aplicada que sustituya, al menos en una primera fase, la ausencia de un marco de retribución específico en España. Por otro, el desarrollo de un reconocimiento normativo de la agrivoltaica como uso dual del suelo, vacío no solo en Euskadi sino en el conjunto del marco europeo. A estos condicionantes regulatorios y financieros, se suman dimensiones frecuentemente infravaloradas en los análisis puramente técnicos, como la aceptación social y la participación de los agricultores en el diseño de los proyectos. La falta de información y el desconocimiento generalizado sobre esta tecnología pueden traducirse en posiciones de rechazo que, de no abordarse desde las fases iniciales, pueden comprometer la viabilidad de cualquier iniciativa, por sólida que sea técnicamente.

En futuros trabajos académicos, sería interesante plantear una evaluación técnico-económica preliminar de un piloto en la Rioja Alavesa o la Llanada Alavesa, que permitiera contrastar con datos reales las hipótesis de diseño formuladas en este estudio. Asimismo, sería especialmente relevante profundizar en la compatibilidad de la agrivoltaica con figuras de protección ambiental, un aspecto apenas mencionado en la literatura disponible y que adquiere una gran importancia en territorios con elevado valor forestal y espacios protegidos.

Bibliografía

[1] E. B. Agyekum, «A comprehensive review of two decades of research on agrivoltaics, a promising new method for electricity and food production,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* 2024.

[2] «IEA,» 2022. [En línea]. Available: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022.

[3] «IEA,» 2025. [En línea]. Available: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-electricity-capacity-growth-by-technology-segment-and-solar-pv-share-main-case-2013-2030.

[4] M. Kumpanalaisatit, W. Setthapun, H. Sintuya, A. Pattiya y S. N. Jansri, «Current status of agrivoltaic systems and their benefits to energy, food, environment, economy, and society,» *Sustainable Production and Consumption,* 2022.

[5] «Solar Power Europe,» 2023. [En línea]. Available: https://www.energias-renovables.com/panorama/estos-son-los-diez-gr-ficos-que-20250826 .

[6] L. Pekk, P. S. Varbanov, T. Pan, Z. Weltsch, B. Radli-Burjan, A. Hary y X. C. Wang, «Future of Agrivoltaic projects: A review from the technological forecasting perspective,» *Cleaner Engineering and Technology,* 2025.

[7] S. Coluccia, M. Ruocco, D. Della Porta y G. Langella, «Agrivoltaic systems: State of the art and potential field applications,» *Energy Reports,* 2025.

[8] M. Trommsdorff, I. S. Dhal, Ö. E. Özdemir, D. Ketzer, N. Weinberger y C. Rösch, «Agrivoltaics: Solar power generation and food production,» de *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems*, 2022.

[9] F.-I. f. S. E. ISE, «Fraunhofer ISE,» [En línea]. Available: https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html.

[10] U. Jamil y J. M. Pearce, «Agrivoltaics as a systems innovation: Multi-dimensional benefits from global studies across climate, agriculture, energy, and ecosystems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2026.

[11] J. Böhm, T. de Witte, F. Offermann y U. Latacz-Lohmann, «Preserving agricultural land with agrivoltaic – But at what cost? An economic analysis of different agrivoltaic systems in Germany,» *Land Use Policy,* 2026.

[12] R. Maity, N. P. Hariram, M. M. Quazi y S. Kumarasamy, «Agrivoltaic systems for sustainability: An overview of emerging trends and practices,» *Solar Compass,* 2025.

[13] S. Tomasi, C. Pellegrini, F. Gaspari, S. Vitale, M. Macarulla Martí, A. Gras y S. Gantioler, «Agrivoltaics as a win-win for rural regions? Energy and environmental justice perspectives across Italy, Spain, Belgium, and the Netherlands,» *Energy Research and Social Science,* 2025.

[14] A. Amadeh, Q. Long, H. J. Williams y K. M. Zhang, «An integrated control framework for optimal sunlight sharing in agrivoltaic systems,» *Solar Energy,* 2026.

[15] S. Amaducci, X. Yin y M. Colauzzi, «Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production,» *Applied Energy,* 2018.

[16] T. u. Rehman, M. A. Qaisrani, B. M. Shafiq, Y. F. Baba, N. Aslfattahi, A. Shahsavar, T. A. Cheema y C. W. Park, «Global perspectives on advancing photovoltaic system performance—A state-of-the-art review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2025.

[17] I. Arias-Navarro, B. Miras-Cabrera, C. Toledo, A. M. Agulló-Torres, J. Padilla, Á. Martínez-Poveda y F. J. Del Campo-Gomis, «Assessing the social perception of agrivoltaic systems in vineyards. A case study of an integrated trellis-based configuration in South-eastern Spain,» *Renewable Energy Focus,* 2026.

[18] A. S. Pascaris, C. Schelly, L. Burnham y J. M. Pearce, «Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics,» *Energy Research and Social Science,* 2021.

[19] C. Seay-Fleming, T. Swanson, A. K. Gerlak, M. A. Pavao-Zuckerman, H. Andrews, K. Moore y G. A. Barron-Gafford, «Cultivating engagement: Public participation in agrivoltaics planning and design,» *Energy Research and Social Science,* 2025.

[20] U. Jamil, N. McDonnell, P. Davies, M. Taylor y J. M. Pearce, «Creating just agrivoltaic transitions for large-scale solar: a comparative multi criteria analysis,» *Solar Energy,* 2026.

[21] aemet, «Agencia Estatal de Meteorología,» [En línea]. Available: https://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/espana?k=pva&w=11.

[22] G. Vasco, «Euskalmet,» [En línea]. Available: https://www.euskalmet.euskadi.eus/el-tiempo/euskadi/.

[23] G. Vasco, «Euskadi.eus,» Abril 2023. [En línea]. Available: https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/proceso_elaboracion_ptsere/es_def/adjuntos/INICIAL-DOC-5-3-EST-AMB-ESTRATEGICO-ANEXO3.pdf.

[24] D. R. A. y. P. Instituto Vasco de Estadísitca. Departamento de Alimentación, «Eustat,» 2025. [En línea]. Available: https://www.eustat.eus/elementos/tbl0004295_c.html.

[25] D. R. A. y. P. Departamento de Alimentación, «euskadi.eus,» 2024. [En línea]. Available: https://www.euskadi.eus/estadistica/superficie-produccion-y-rendimientos-agricolas/web01-a2estadi/es/.

[26] «Mapas topográficos,» [En línea]. Available: https://es-es.topographic-map.com/map-8ltnh/Pa%C3%ADs-Vasco/.

[27] Ihobe, «Urban Klima 2050,» [En línea]. Available: https://urbanklima2050.eu/es/marco-estrategico/.

[28] S. P. Europe, «Agrisolar,» [En línea]. Available: https://agrisolareurope.org/map/.

[29] Sun'Agri, «Sun'Agri,» [En línea]. Available: https://sunagri.fr/hubfs/Cas%20clients%20PDF/cas-client-tresserre-2-sunagri.pdf.

[30] Sun'Agri, «Sun'Agri,» 2009. [En línea]. Available: https://sunagri.fr/realisations-agrivoltaiques/projet-agrivoltaique-tresserre.

[31] F. I. f. S. E. S. ISE, «Fraunhofer ISE,» Julio 2020. [En línea]. Available: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/APV-Guideline.pdf.

[32] P. Tree, «Powerful Tree,» [En línea]. Available: https://powerfultree.com/proyectos/agrivoltaica-san-gabriel/.

[33] g. d. i. F. p. l. E. R. d. l. U. d. Córdoba, «AGRIVOLTEA,» [En línea]. Available: https://agrivoltea.org/?menu=Proyectos&proyecto=1744109166341x697815595088127200.

[34] E. Union, «Symbiosyst,» [En línea]. Available: https://www.symbiosyst.eu/wp-content/uploads/2026/05/SYMBIOSYST_DELIVERABLE_WP5_D5.5_30042026.pdf.

[35] insolight, «insolight,» 1 julio 2021. [En línea]. Available: https://insolight.ch/press/launch-of-a-multi-functional-pilot-agrivoltaic-installation-by-insolight-romande-energie-and-agroscope/.

[36] insolight, «insolight,» 4 julio 2023. [En línea]. Available: https://insolight.ch/press/agronomic-results-of-agrivoltaic-pilot/.

[37] insolight, «insolight,» 19 septiembre 2025. [En línea]. Available: https://insolight.ch/press/insolight-in-collaboration-with-agroscope-romande-energie-and-the-canton-of-valais-inaugurates-its-first-agrivoltaic-orchard-installation-in-conthey-switzerland/.

[38] E. V. d. l. Energia, «Agencia Energética del Gobierno Vasco,» [En línea]. Available: https://www.eve.eus/impulsamos-la-transicion/la-energia-de-euskadi/mapa-eve-de-energias-renovables/.

[39] E. E. INTAGRI, «Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricutlura,» Octubre 2018. [En línea]. Available: https://www.intagri.com/public_files/125.-Plantas-C3-C4-y-CAM.pdf.