Análisis de idoneidad territorial para sistemas APV en la Comunidad de Madrid: una evaluación multicriterio asistida por SIG

MSC

Juan Nicolás Borbón Calderón



Universidad Europea

Análisis de idoneidad territorial para sistemas APV en la Comunidad de Madrid: una evaluación multicriterio asistida por SIG

Autor:

Juan Nicolás Borbón Calderón

Máster Universitario en Transición Energética Renovable

Módulo 10, Trabajo Fin de Máster

Tutor:

Santiago Ruíz Laiseca

Madrid, 2026

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS 5
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES 6
ÍNDICE DE FÓRMULAS 7
ÍNDICE DE ANEXOS 8
ÍNDICE DE CÓDIGOS ANEXOS 9
RESUMEN 10
ABSTRACT 11
AGRADECIMIENTOS 12
1. INTRODUCCIÓN 13
2. ESTADO DEL ARTE 16
2.1. Concepto de APV: evolución y beneficios sinérgicos 16
2.1.1. Evolución tecnológica 16
2.1.2. Beneficios sinérgicos 18
2.2. Marco Legal y Regulatorio 20
2.2.1. Normativa Europea y nacional sobre renovables 20
2.2.2. Directrices de la Comunidad de Madrid 22
2.3. Casos de éxito y referentes. 23
2.3.1. Referentes internacionales 23
2.3.2. Referentes nacionales 26
2.4. Aplicación de los SIG en la evaluación de idoneidad para sistemas APV 29
2.4.1. SIG como herramienta de planificación territorial energética 30
3. OBJETIVOS 32
3.1. Objetivo general 32
3.2. Objetivos específicos 32
4. METODOLOGÍA 33
4.1. Fase 1: Recopilación de información 34
4.2. Fase 2: inventario y normalización de datos 35
4.3. Fase 3: análisis de la situación actual mediante PyGIS 38
4.4. Fase 4: Generación del mapa de idoneidad de la APV en la Comunidad de Madrid y Análisis 39
4.5. Fase 5: Validación energética de las zonas óptimas mediante PVSyst 40
4.5.1. Planteamiento 40

4.5.2. Configuración del sistema PV 40
4.5.3. Adaptación del sistema PV a una estructura APV 41
4.5.4. Parametrización de las pérdidas del sistema 43
4.6. Limitaciones del proyecto. 43
5. PLANIFICACIÓN 44
5.1. Modelo de proceso adoptado 44
5.2. Plan de trabajo y calendario 45
5.3. Recursos empleados 46
5.4. Alcance del proyecto 47
5.5. Análisis de viabilidad 48
5.6. Indicadores de control y seguimiento 48
5.7. Gestión de cambios 49
6. DESARROLLO. 50
6.1. Arquitectura del modelo y su encadenamiento 50
6.2. Armonización y preparación de las capas base 51
6.3. Normalización de los criterios. 52
6.4. Restricciones absolutas frente a criterios compensatorios 53
6.5. Implementación de la superposición ponderada 54
6.6. Clasificación del índice en categorías de idoneidad 55
6.7. Acoplamiento con la capa catastral del SIGPAC 56
6.8. Selección de los puntos representativos para la validación 56
6.9. Verificación y control de calidad 57
6.10. Comportamiento del modelo y análisis de sensibilidad 57
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 60
7.1. Distribución territorial de la idoneidad APV 60
7.2. Priorización APV para cultivos de olivar y viñedo 62
7.3. Validación energética mediante simulación PVSyst 63
7.3.1. Resultados de las simulaciones 63
7.4. Relación entre el índice de idoneidad y la producción energética obtenida 64
7.5. Estimación del impacto económico y social 65
7.5.1. Producción a lo largo de la vida útil 65
7.5.2. Costes y sobre costes APV 65
7.5.3. Ocupación del suelo 66

7.5.4. Escalabilidad territorial 67
7.5.5. Impacto social 68
7.6. Gestión de residuos y fin de vida útil de los sistemas APV 68
8. CONCLUSIONES 69
9. RECOMENDACIONES 71
10. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE. 72
10.1. ODS 2 — Hambre Cero. 72
10.2. ODS 7 — Energía asequible y no contaminante. 72
10.3. ODS 11 — Ciudades y comunidades sostenibles. 73
10.4. ODS 13 — Acción por el clima. 73
10.5. ODS 15 — Vida de ecosistemas terrestres. 74
11. PERSPECTIVAS Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO. 74
11.1. Consolidación y Calibración del modelo 74
11.1.1. Corrección de las distancias de referencia en la normalización 74
11.1.2. Simplificación de la formulación del modelo 75
11.1.3. Validación de la ponderación mediante consulta a expertos 75
11.1.4. Análisis de sensibilidad mediante escenarios alternativos para la ponderación 75
11.1.5. Revisión de la reclasificación de la capacidad agrológica 76
11.1.6. Unificación de rejillas de trabajo 76
11.2. Validación energética y agronómica 76
11.2.1. Ampliación del muestreo mediante la estratificación aleatoria 76
11.2.2. Sensibilidad de la producción con respecto a la estructura 76
11.2.3. Validación cruzada del recurso solar 77
11.2.4. Evaluación económica a lo largo de la vida útil 77
11.3. Transferencia y escala 77
11.3.1. Descenso a la escala de la parcela 77
11.3.2. Ampliación de los cultivos considerados 77
11.3.3. Articulación con el marco normativo e institucional 78
11.3.4. Transferibilidad a otras regiones 78
11.3.5. Publicación del modelo como herramienta abierta 78
BIBLIOGRAFÍA 79
ANEXOS 91

CÓDIGOS ANEXOS 117
12. ANEXO INFORMES PVSYST 139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Usos del Suelo, Comunidad de Madrid 22
Tabla 2. Resumen del Inventario de datos 36
Tabla 3. Criterios de evaluación y pesos del modelo de idoneidad APV. 37
Tabla 4. Tabla de factores de sombreado (lineal) 42
Tabla 5. Parámetros de Pérdidas del Sistema 43
Tabla 6. Hitos del proyecto 46
Tabla 7. Recursos empleados 46
Tabla 8. Análisis de viabilidad del proyecto 48
Tabla 9. Indicadores de control del proyecto 48
Tabla 10. Normalización aplicada por criterio 53
Tabla 11. Pesos nominales y efectivos sobre el territorio evaluado 54
Tabla 12. Intervalos del índice y superficie por categoría de idoneidad 55
Tabla 13. Coordenadas de Simulación 56
Tabla 14. Comportamiento efectivo de los criterios evaluados 58
Tabla 15. Escala de los criterios de distancia 58
Tabla 16. Distribución Territorial de la Idoneidad APV en la Comunidad de Madrid ... 60
Tabla 17. APV y cultivos de Olivar y Viñedo 62
Tabla 18. Resultados de la Simulación Inicial en PVSyst 63
Tabla 19. Resultados de la Simulación en PVSyst 63
Tabla 20. Estimación de costes del sistema APV (99 kWp) 66
Tabla 21. Escenarios de implantación agrivoltaica sobre OV y VI de idoneidad Alta y Muy Alta 67
Tabla 22. Superficie total por municipios de la limitación del 4% 103
Tabla 23. Idoneidad por Municipio de la Comunidad de Madrid 108

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Conceptualización diseñada por Goetzberger y Zastrow 16
Ilustración 2. Conceptualización diseñada por Akira Nagashima. 17
Ilustración 3. Estructura APV en cultivo de papa diseñada por Schindele et al. 18
Ilustración 4. Estructura APV, parámetros técnicos. 18
Ilustración 5. Ejemplo de implementación de la solución para huertos. 25
Ilustración 6. Paso de la radiación difusa con la tecnología THEIA. 25
Ilustración 7. Invernadero Fotovoltaico Onyx Solar. 27
Ilustración 8. Estructura APV Intecsa Solar, paso de maquinaria. 28
Ilustración 9. Estructura APV Intecsa Solar, ganadería. 28
Ilustración 10. Mapa de idoneidad para Konya 31
Ilustración 11. Diagrama de flujo, metodología. 33
Ilustración 12. Suma Hectáreas del límite del 4% en QGIS 39
Ilustración 13. Vista Superior del Sistema PV 41
Ilustración 14. Vista Frontal del Sistema PV 42
Ilustración 15. Distribución temporal de las Fases metodológicas 45
Ilustración 16. Encadenamiento operativo del modelo: operaciones ejecutadas y productos intermedios generados en cada fase. 50
Ilustración 17. Idoneidad en el cuadrante sur de la Comunidad de Madrid 61
Ilustración 18. Idoneidad en el cuadrante norte de la Comunidad de Madrid 61

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1. LER 19
Fórmula 2. LER Sintetizada 19
Fórmula 3. Factor de Calidad 19
Fórmula 4. Modelo de suma ponderada 53
Fórmula 5. Índice APV 54
Fórmula 6. LCOE 65
Fórmula 7. Energía actualizada 65

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Relieve Comunidad de Madrid, Pendiente (°) 91
Anexo 2. Clasificación agrícola Comunidad de Madrid 92
Anexo 3. Radiación Solar Anual en la Comunidad de Madrid 93
Anexo 4. Idoneidad PV en la Comunidad de Madrid, limitación del 4% 94
Anexo 5. Red de Alta Tensión de la Comunidad de Madrid 95
Anexo 6. Red Natura 2000 en la Comunidad de Madrid 96
Anexo 7. Subestaciones en la Comunidad de Madrid 97
Anexo 8. Zona Urbanizada de la Comunidad de Madrid 98
Anexo 9. Mapa de Idoneidad APV de la Comunidad de Madrid 99
Anexo 10. Uso declarado del Suelo en la Comunidad de Madrid 100
Anexo 11. Mapa de Priorización APV para Olivos y Viñedos 101
Anexo 12. Red viaria Madrid 102
Anexo 13. Superficie total por municipios de la limitación del 4% 103
Anexo 14. Tabla de Idoneidad por Municipio de la Comunidad de Madrid 108
Anexo 15. Mapa de Idoneidad por Municipio 116

ÍNDICE DE CÓDIGOS ANEXOS

Anexo C. 1 Script de asignación de idoneidad por centroide a parcelas SIGPAC 117
Anexo C. 2 Script de selección de parcelas representativas 121
Anexo C. 3 Script de cálculo zonal y agregación por municipios 123
Anexo C. 4. Script cálculo de áreas por municipio del límite del 4% 128
Anexo C. 5 Script para Verificación Fórmula 2 132
Anexo C. 6 Script para Verificación de los umbrales de clasificación 134
Anexo C. 7 Script para Comportamiento de criterios 136

RESUMEN

El suelo agrícola y la generación fotovoltaica (PV) compiten por un mismo territorio. La Comunidad de Madrid ha limitado el despliegue PV al 4% del suelo municipal para proteger sus paisajes y sus suelos, restricción que tensiona el cumplimiento de la Directiva RED III. La agrivoltaica (APV) permite la operación dentro de esta limitación al hibridar la producción agrícola y la energética sobre la misma superficie.

Este trabajo desarrolla un mapa de idoneidad territorial para APV en la Comunidad de Madrid mediante la evaluación multicriterio asistida por SIG, implementando un modelo de combinación lineal ponderada en QGIS sobre siete criterios físico-solares, agrológicos e infraestructurales, con exclusión previa de suelos en la Red Natura 2000 y el suelo urbanizado. El resultado se clasificó en cuatro categorías y se cruzó con la capa catastral del SIGPAC. Como validación de la cartografía se realizó la simulación energética en PVSyst.

Las clases de idoneidad Alta y Muy Alta suman 204.249,5 ha, de las cuales 19.872,7 ha corresponden a parcelas de olivar (OV) y viñedo (VI). La simulación se establece en las parcelas de VI, y confirma que la clase Muy Alta alcanza la mayor producción específica (1.803 kWh/kWp/año), sin embargo, las clases intermedias tienen diferencias despreciables, lo cual acota el índice como herramienta de selección territorial y no como predictor de la producción energética.

Palabras clave: agrivoltaica, SIG, evaluación multicriterio, idoneidad territorial, Comunidad de Madrid.

ABSTRACT

Agricultural land and photovoltaic (PV) generation compete for the same territory. The Community of Madrid has limited PV deployment to 4% of municipal land in order to protect its landscapes and soils. This restriction, however, creates additional challenges for meeting the requirements of the RED III Directive. Agrivoltaics (APV) offers a way to operate within this constraint by combining agricultural and energy production on the same land.

This study develops a territorial suitability map for APV in the Community of Madrid using GIS-assisted multi-criteria evaluation. A weighted linear combination model was implemented in QGIS based on seven physical-solar, agrological, and infrastructure-related criteria, following the prior exclusion of land within the Natura 2000 network and urbanized areas. The resulting suitability map was classified into four categories and overlaid with the SIGPAC cadastral layer. As a validation of the resulting spatial assessment, an energy simulation was carried out using PVSyst.

The High and Very High suitability classes cover a total of 204,249.5 ha, of which 19,872.7 ha correspond to olive groves (OV) and vineyards (VI). The energy simulation was conducted on VI parcels and confirmed that the Very High suitability class achieves the highest specific yield (1,803 kWh/kWp/año). However, the differences between the intermediate suitability classes are negligible. This indicates that the index is more suitable as a territorial screening and site-selection tool than as a predictor of energy production.

Keywords: agrivoltaics, GIS, multi-criteria evaluation, territorial suitability, Community of Madrid.

AGRADECIMIENTOS

Al profesorado del Máster Universitario en Transición Energética Renovable de la Universidad Europea, cuya formación constituye la base de los planteamientos técnicos y metodológicos aquí desarrollados.

A las instituciones que sostienen la política de datos abiertos que ha hecho posible este trabajo: la Infraestructura de Datos Espaciales de la Comunidad de Madrid, el Centro Nacional de Información Geográfica, el Fondo Español de Garantía Agraria, el Joint Research Centre de la Comisión Europea y el Banco Mundial a través del Global Solar Atlas. Sin la disponibilidad pública y gratuita de sus capas cartográficas, un estudio de estas características resultaría inabordable en el marco de un trabajo de fin de máster.

A mi familia, novia y amigos por el acompañamiento durante estos meses.

1. INTRODUCCIÓN

En este último año hemos sido anfitriones y víctimas de alteraciones en el medio ambiente cada vez más evidentes, inviernos que alcanzan los 45°C bajo cero en EE. UU., montañas de nieve en Rusia, incendios forestales en Argentina, Estas anomalías climáticas no solo demuestran la fragilidad del planeta, sino que tienen un impacto humano directo: según la UNHCR (2024), han provocado el desplazamiento de aproximadamente 250 millones de personas hasta 2023. Ante este escenario, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) advierte sobre la complejidad de alcanzar nuevas soluciones a medida que estas desviaciones incrementan, por lo que nuevas soluciones deben ser planteadas de frente al cambio climático (CC). Esto es una de las múltiples representaciones del desequilibrio energético que estamos experimentando diariamente, en el informe anual del Estado Mundial del Clima del 2025 la OMM incluye este nuevo indicador, y asegura que nuestras actividades están no solo alterando exponencialmente el equilibro natural de la tierra, sino que las consecuencias permanecerán por miles de años y tendremos que aprender a vivir con ellas (Naciones Unidas, 2026).

Uno de los sectores más representativos en la contribución al CC es el sector energético, es indiscutible que la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) carga con una gran parte de esta responsabilidad ambiental. En 2024 las emisiones de GEI aumentaron alrededor del 1% debido a la quema de combustibles fósiles, esto equivale a 357 Mt (millones de toneladas) equivalentes de CO_2 según informa la IEA (2025), Si se examina al mayor portador de estas, el gas natural experimentó un alza de 2.5%, esencialmente en China, Estados Unidos, Oriente Medio e India (El Periódico de la Energía, 2025). En otras palabras, necesitaríamos el 97% de la superficie de Madrid y 40 años para captar esta cantidad de residuos atmosféricos que ya se encuentran en la atmósfera que respiramos, plantando más de 73 millones de Eucaliptos (Eucalyptus globulus), teniendo en cuenta que esta es una de las especies con mayor capacidad de absorción de CO_2 (MITECO, 2025).

Existen diversas tecnologías que nos pueden abrir los caminos a la acción y que nos señalan un horizonte renovado. Entre estas soluciones se encuentra la energía fotovoltaica, una medida basada en el aprovechamiento de la primera energía que percibimos todos los días: el sol. Por medio de paneles solares (PV) se realiza la captación de los fotones provenientes de la radiación, generando un flujo eléctrico, que será aprovechado como energía útil por el consumidor final. Aunque suene viable y abundante necesita de grandes extensiones de terreno, libres de obstáculos y en una ubicación favorecida para generar una cuota considerable de energía. En el 2025, más de 8.700 MW fueron instalados en España, creciendo un 26,6% con respecto al año anterior, representando cerca del 30% de la potencia instalada con 41.500 MW de potencia desplegada por todo el país (Red Eléctrica de España, 2026). Para 2024 el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2024) calculó que la superficie utilizada para los sistemas fotovoltaicos fue de 47.298 hectáreas, partiendo de la consideración de 2 hectáreas por cada MW instalado. Ahora bien, bajo este supuesto, y con una simple

multiplicación podemos afirmar que cerca de 83.000 hectáreas son utilizadas actualmente para este fin. En este mismo reporte, se evidenció que el 6% de los parques en 2022 ocupaban terrenos que en 2012 correspondían al uso de suelo de regadío (2.499 ha).

El panorama para los suelos de uso agrícola, o con potencial para este, no es del todo alentador. Se espera que para el 2100 la degradación y desertificación de este decrezca, de forma global, entre 50.000.000 ha (el tamaño de España) y 650.000.000 (dos veces el tamaño de la India) (IPCC, 2019), gracias a los cambios socioeconómicos y desarrollo en vivienda que la humanidad ha ido desarrollando (Schindele et al., 2020). Además de la pérdida en la riqueza del terreno, según el IPCC (2023) la producción agrícola en Europa se verá afectada en los próximos años debido a la combinación entre calor, sequía y condiciones climáticas extremas que se experimentarán en este continente, y las respuestas de adaptación que se han venido implementando comúnmente en la agricultura serán menos efectivas a partir de un aumento de 2°C en la temperatura global. Sujeto a este panorama la discusión entre el despliegue de energías limpias—PV—, el uso del suelo, y la adaptación del sector agronómico da la vía libre al ingenio, a la hibridación entre disciplinas y la adaptación, no solo de las especialidades, sino también de los sistemas que estamos acostumbrados a desplegar.

Frente a esta discusión la Comunidad de Madrid ha tomado una postura protectora, tanto así que ha solicitado la verificación de las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) de plantas fotovoltaicas que suponen cerca de 10.500 hectáreas, afirmando su postura de realizar la transición energética “con criterios de equilibrio, rigor y adecuada ordenación del territorio” (Comunidad de Madrid, 2026), advirtiendo de los efectos que puede tener sobre los suelos de alto valor productivo para olivares y viñedos, resaltando el peso cultural que estos tienen. Bajo esta posición, la Comunidad de Madrid (s.f.), prioriza una salvaguarda en los suelos de protección ambiental y de desarrollo agrícola implementando una metodología basada en la cartografía sintética para analizar los aproximadamente 8.000 km^2 del territorio Madridleño, y, así, lograr la determinación de alrededor de 320 kilómetros cuadrados, 4% del territorio, designando un Índice de Capacidad de Acogida (ICA), y buscando la coexistencia en los usos del suelo con este Plan de Protección del Paisaje. Así, demuestran que “la prioridad para el Ejecutivo autonómico es aprovechar para estas instalaciones infraestructuras existentes, como cubiertas y zonas de baja productividad agrícola y ambiental, habiendo conseguido pasar de 370 en 2018 a más de 100.000 en 2025” (Comunidad de Madrid, 2026) emplazamientos de autoconsumo, dejando en claro que el crecimiento y la prioridad es sobre las cubiertas o tejados madridleños y no las macro plantas fotovoltaicas.

Es acá en donde se interseca el uso de suelo, la limitación técnica y la necesidad de expansión de las energías renovables para la descarbonización. Una de las soluciones que surge de la tecnología fotovoltaica, que favorece los suelos agrícolas y se posiciona como un uso sinérgico y reciproco es: la agrivoltaica (APV), una solución prometedora frente a esta situación que se presenta en la actualidad madridleña. Este concepto fue propuesto por primera vez por Goetzberger y Zastrow en 1982, y no fue sino hasta el 2004 cuando el ingeniero japones Akira Nagashima ejecuta el primer sistema APV en Chiba, Japón,

estableciendo un concepto clave para el despliegue de la tecnología: “solar sharing” (Tajima & Iida, 2021), en donde las dos partes del sistema “comparten” la radiación que llega al punto geográfico en donde se encuentran. Teniendo en cuenta el punto de saturación de las plantas del sistema se establece la tasa de sombra, el cual busca favorecer tanto a la producción energética como a la producción agrícola. Por otro lado, cabe resaltar que estos dos sectores pasan a compartir el uso del proponiendo una infraestructura que fomenta la producción dual: generación de energía limpia y productividad en la producción agrícola y ganadera.

Los cambios son climáticos y con ello: políticos y tecnológicos. Avanzan como una rueda a gran velocidad, que se precipita ante un abismo inminente e inaplazable. Los antecedentes expuestos revelan la tensión estructural que se vive en el territorio madridleño: expansión urgente de las energías renovables conviviendo con la limitación del 4% del suelo municipal, que prioriza la protección de los suelos agrícolas de alto valor productivo. Esta tensión, alejada de ser un obstáculo, nos da un punto de partida para esta investigación. La APV emerge como moderador, como aquella solución tecnológica que es capaz de transformar la restricción en una oportunidad, permitiendo la coexistencia de la producción agrícola y energética en una misma unidad de superficie. Sin embargo, su despliegue debe realizarse de manera responsable: requiere una evaluación rigurosa del territorio integrando distintos criterios físicos, agrológicos, normativos e infraestructurales, simultáneamente. Es allí en donde los SIG, combinados con métodos de evaluación multicriterio, representan la herramienta idónea para este primer paso. Por lo tanto, este trabajo propone el desarrollo de un mapa de idoneidad territorial para la APV en la Comunidad de Madrid, apoyado en el análisis multicriterio apoyado por QGIS 3.40.10 y PyGIS, con el objetivo de identificar las zonas óptimas para estos emplazamientos híbridos, garantizando el seguimiento a la normatividad vigente y la preservación del patrimonio ambiental y agrónomo de la región.

Esta herramienta no se limitará únicamente al análisis cartográfico. El análisis multicriterio asistido se complementa con una validación energética mediante la simulación PV en PVSyst, con la finalidad de trascender de lo territorial a lo cuantificable, de lo visual a lo técnico, los datos proporcionados por el software dan una visión del potencial de generación esperado en las zonas de mayor idoneidad anteriormente identificadas. Esta dimensión, ausente en los estudios tomados en cuenta, permite dotar el estudio de un carácter dual: no solo señalando la posibilidad de emplazar la APV de forma responsable, sino que pasa a la estimación de la energía que puede generarse en los emplazamientos, generando una herramienta de preselección territorial más completa, de apoyo para la toma de decisiones territoriales y energéticas en la Comunidad de Madrid.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Concepto de APV: evolución y beneficios sinérgicos

Se puede definir a la APV como el sistema de gestión del suelo que permite la generación de energía solar fotovoltaica y la producción agrícola de manera integrada sobre una misma unidad de superficie. A diferencia de las instalaciones fotovoltaicas terrestres convencionales, esta tecnología busca la convivencia entre dos usos del territorio distinto, sin necesidad de desplazar a ningún sector que necesite el suelo para su propio desarrollo (Fraunhofer ISE, 2023).

2.1.1. Evolución tecnológica

El concepto inició en 1982, propuesto por Adolf Goetzberger y Armin Zastrow, y aunque se detuvo su investigación, su despliegue comercial ha sido acelerado desde el 2010 debido a la madurez que se ha alcanzado técnicamente (Moreda-Cantero et al., 2025), estos científicos proponen elevar la estructura dos metros y aumentar el distanciamiento entre los módulos tres veces la altura de esta elevación, con el fin de alcanzar una radiación uniforme sobre el suelo (que posteriormente aprovecharan las plantas) y permitir así el paso de la maquinaria agrícola, Pignataro et al. (2021) nos ilustra con un esquema de la primera visión de los sistemas APV (Ilustración 1).

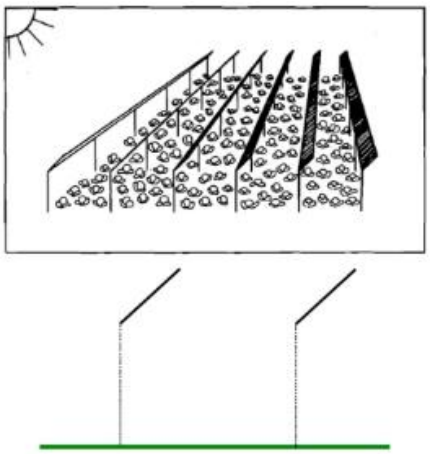


Ilustración 1. Conceptualización diseñada por Goetzberger y Zastrow

Tomado de: Pignataro et al., 2021.

Después de esta conceptualización pasaron algunos años para pasar a la ejecución de esta tecnología, es alrededor del 2004 cuando en Chiba, Japón, el ingeniero Akira Nagashima con 24 módulos PV ejecuta un sistema APV similar a la pérgola de jardín (Ilustración 2), en donde diseña distintos campos de prueba para evaluar los diferentes puntos de saturación de cada cultivo (Tajima & Iida, 2021). A este punto le llama “solar sharing”, y, Pignataro et al. (2021), lo describe como la radiación solar total es utilizada por las plantas para realizar su máxima tasa de fotosíntesis, entre el 3 y 6% de la cantidad sobre el mismo punto. Así, el sistema se vuelve un captador eficiente de la energía total que se percibe en una misma posición.

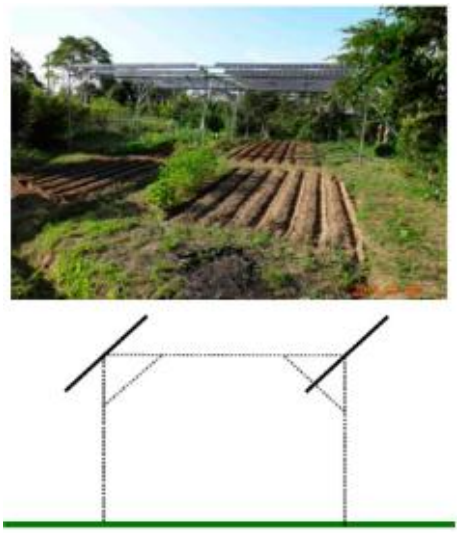


Ilustración 2. Conceptualización diseñada por Akira Nagashima.

Tomado de: Pignataro et al., 2021.

Ahora bien, la tecnología APV no es una medida aplicable a cualquier cultivo, pues este está sujeto a el factor más importante para tener en cuenta en cualquier proyecto: el monetario. La inversión inicial para la instalación puede llegar a ser elevada, por lo cual la escogencia del cultivo es muy importante para lograr una rentabilidad de los proyectos, pues el beneficio compartido es la clave para el éxito de este. La APV no es recomendada para cultivos rotativos. Sin embargo, en la combinación con cultivos permanentes—por ejemplo, frutos del bosque, frutales o vid (viñedos)—, el precio es menor, y esto, a su vez, proporciona un rendimiento mayor gracias a la optimización de las sinergias tecnológicas (Schindele et al., 2020). En un estudio realizado por Schindele et al., en Alemania, se resalta que el costo nivelado de la electricidad (LCOE) (Levelized Cost Of Electricity, por sus siglas en inglés) es más alto en los sistemas APV, comparado con los PV tradicionales, siendo un 38% mayor. Sin embargo, cuando se relaciona con el tipo de cultivo es cuando el beneficio es palpable, por esto, se analizaron dos cultivos: papa y trigo, allí, se obtuvo un rendimiento de 10.707 y 1.959 euros por cada hectárea al año, respectivamente, y representando una relación de rendimiento del 0,85, favorable para la papa, y 4,62 para el trigo (un cultivo exclusivo del invierno), representando una desventaja para este tipo de cultivos.

A continuación, se explica el sistema con el que se obtuvieron estas conclusiones:

- Estructuras Fijas Elevadas: Instalaciones entre 2 y 5 metros que permiten el paso de la maquinaria agrícola y que facilitan la ventilación. Acá destaca el beneficio que tiene los cultivos con este tipo de estructuras, pues genera un microclima controlado y genera protección a eventos meteorológicos extremos, como granizo o excesos de radiación.



Ilustración 3. Estructura APV en cultivo de papa diseñada por Schindele et al.

Tomado de: Schindele et al., 2020.

- Sistemas de Seguimiento Dinámico (Tracking APV): se implementan seguidores de un eje, optimizando no solo la generación de energía por la captación de los fotones provenientes del sol, sino que ajustan las sombras proyectadas en la flora, sin embargo, menciona que puede limitar el uso de grandes maquinarias.

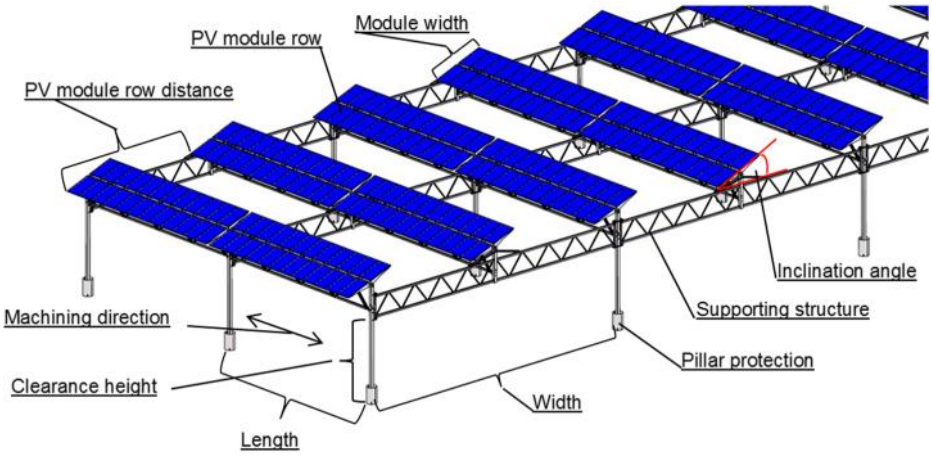


Ilustración 4. Estructura APV, parámetros técnicos.

Tomado de: Schindele et al., 2020.

2.1.2. Beneficios sinérgicos

La medida del éxito que se plantea para la APV se fundamenta sobre el Land Equivalent Ratio (LER) (Índice de equivalencia de Tierra), propuesto por Willey en 1979, fue fundamental para la descripción de los rendimientos de los distintos tipos de cultivos (Pelczar, 2025). Fue hasta el 2011 cuando Dupraz utiliza el LER para tener una descripción mucho más relevante de la APV, en donde integra la relación del rendimiento de un cultivo uno sembrado bajo el sistema APV (Y_{APV}), y, otro en condiciones reglares (Y_S), esto, con la relación entre el volumen de la electricidad en un sistema APV (E_{APV}), y, una planta PV convencional (E_S) (expresados en unidad de superficie). Lo que nos lleva a un sistema expresado así:

Fórmula 1. LER

$$LER = \frac{Y_{APV}}{Y_S} + \frac{E_{APV}}{E_S}$$

Sintetizado en:

Fórmula 2. LER Sintetizada

$$LER = L_C + L_E$$

Basado en esto, la eficiencia del suelo puede aumentarse si se relaciona el uso del suelo agrícola con el energético. Dupraz (2011), resalta que la producción combinada puede aumentar la eficiencia del suelo entre un 60% y un 70% si se compara con la producción por separado. Es decir, si comparamos la producción del sistema agrícola independiente y el sistema energético, la productividad del suelo incrementaría considerablemente, oscilando entre un LER de 1,6 a 1,7. Lo cual nos permite dar una visión inicial de la aptitud territorial—ICA—para este tipo de proyectos, siendo un punto de partida sólido. Por otro lado, cabe mencionar que—con la finalidad del éxito luego de la instalación de una planta APV—para la continuidad productiva positiva de la APV es indispensable tener en cuenta distintos factores como el factor de calidad y el factor de compensación de área para el monitoreo del rendimiento del sistema, Pelczar (2025) lo formula de la siguiente forma:

Factor de Calidad—en donde F_S es la calidad del cultivo en condiciones normales y F_{APV} es este mismo bajo el sistema APV—:

Fórmula 3. Factor de Calidad

$$Q_F = \frac{F_{APV}}{F_S}$$

En donde se busca que Q_F sea mayor a 1 para un impacto positivo de la APV en el cultivo. Además, durante su estudio tiene en cuenta la importancia del área en donde se desarrollan los proyectos, pues si el rendimiento agrícola es bajo en el sistema APV, sería necesario "compensar" más espacio para obtener la misma producción que un sistema convencional (Pelczar, 2025). Ahora bien, cabe resaltar los beneficios que se pueden evidenciar de un sistema APV, y que pueden ser aprovechados para la efectividad de la producción agrícola, entre estos se destacan:

- **Resiliencia Hídrica:** el sombreado parcial del suelo reduce su temperatura y la evapotranspiración, permitiendo la permanencia prolongada del agua en el sistema, estando disponible para el cultivo, además de regular la temperatura de los módulos. Esto genera un microclima que mejora la humedad del terreno y reduce la necesidad de riego entre un 14% y un 29%, y, en algunos sistemas, permite un ahorro de hasta un 20% (Weselek et al., 2019).
- **Protección:** la infraestructura es un escudo, heladas, granizos y excesos de radiación no impactan negativamente a los cultivos que están protegidos por los módulos. Esto, soporta la resiliencia del sector agrónomo frente al CC, siendo una solución positiva para ciertos tipos de cultivos (cultivos permanentes, como se expone en puntos anteriores) (Weselek et al., 2019).

- **Rendimiento y estabilidad:** la regulación de las temperaturas bajo las células fotovoltaicas mejora el rendimiento eléctrico, esto gracias a la transpiración de los cultivos, posicionando a los sistemas APV como una solución para distintas realidades climáticas. En regiones cálidas, secas o propensas a la sequía, la sombra suele reducir el estrés hídrico y puede aumentar los rendimientos (Weselek et al., 2019).

2.2. Marco Legal y Regulatorio

2.2.1. Normativa Europea y nacional sobre renovables

El CC y las energías renovables generan una sinergia—más allá de necesaria—ideal. En donde existe la normalización de un sector que es necesario para cada actividad que se ejecuta, también existe una problemática arraigada que afecta a la población mundial: las emisiones de GEI. El CO2 es uno de los que más relevancia adquiere cuando se trata de disminuirlos, pues, el aumento de este hace que las temperaturas se eleven y percibamos estos cambios en el clima que percibimos todos los días. Este, proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles—carbón, petróleo y gas natural—, así como de procesos naturales como incendios forestales y erupciones volcánicas, y gracias a los niveles de vida exigentes que llevamos hoy en día, hoy, experimentamos una subida de 1,5 veces más que el aumento natural que ocurrió hace 20.000 años en la edad de hielo (NASA, 2024). Según la IEA (2025), aunque los esfuerzos por reducir este gas han sido positivos en la Union europea (UE), cerca de 135 Mt de CO2 representaron un 0,9% de aumento a nivel global. Esto, debido a que la Directiva Europea, conocida como RED III, estableció el plan REPowerEU, con el objetivo de que al menos el 42,5% de producción energética sea de origen renovable para 2030, buscando poner fin rápidamente a la dependencia de combustibles fósiles. Para esto, introduce el concepto de las “zonas de aceleración renovables”, designando a los estados miembros a planificar estas en sus territorios, y establece que deben asignarse sobre la diferenciación del tipo de tecnología; además, menciona la importancia de utilizar zonas que no estén ligadas a los espacios de la Red Natura 2.000—zonas ambientales protegidas—, y zonas dedicadas a la agricultura (Parlamento Europeo, 2023).

La protección de los recursos naturales y el desarrollo agronómico es fundamental cuando nos referimos al despliegue de energías, y más aún cuando estas requieren grandes extensiones de tierra. Por esto, España apuesta por la integración de “la generación de energía eléctrica y el desarrollo rural para la protección de la biodiversidad”, lo que puede representar un desafío cuando se habla de energía PV (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], 2023). En el 2020 ya se contaban con 11 GW de potencia PV instalada en España, y se esperaba un crecimiento continuo para alcanzar 46 GW en 2025 y 76 GW en 2030 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], 2023), y si consideramos 2 hectáreas por cada MW instalado (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2024) cerca de 82 mil hectáreas se necesitaron para el año 2020 y se necesitarán 152.000 para 2030, es decir, necesitaríamos más de 2 veces la extensión de Madrid para alcanzar este objetivo. Sin embargo, para el 2025 se alcanzó un potencial de alrededor de 41 GW instalado—5 GW

menos de lo planificado—, creciendo cerca del 26,6% con respecto al año anterior y representando cerca del 30% de la matriz energética, de allí solo un 0,2% corresponde a la Comunidad de Madrid (Red Eléctrica de España, 2026). Así, la incorporación de nuevas tecnologías representa una oportunidad importante para las posibilidades madridleña.

Es indispensable que la transición energética venga acompañada con incentivos, ya sean monetarios o estructurales, estos, basados en el contexto, las estrategias y las políticas de cada país para enfrentar al CC. En el Plan Estratégico de la Política Agrícola Común (PEPAC) existen algunos requisitos y compromisos para el despliegue de las energías renovables en España, como, por ejemplo: Situar los nuevos parques eólicos y fotovoltaicos en zonas de baja sensibilidad ecológica y ambiental, incluyendo zonas marinas; Compromisos agroambientales en superficies agrarias, Prácticas para la mejora del suelo y lucha contra la erosión. Evidenciando una preocupación por el sector agrícola por el cuidado de la calidad del suelo con visualizaciones a la transición energética. Por otro lado, estos requerimientos subsisten con las ayudas, siendo pilares para un desarrollo sostenible del sector agrícola, entre estas están: Ayudas a inversiones no productivas en explotaciones agrarias vinculadas a la mitigación-adaptación al cambio climático, uso eficiente de los recursos naturales y biodiversidad; Ayudas a inversiones productivas en explotaciones agrarias vinculadas a contribuir a la mitigación-adaptación al cambio climático, uso eficiente de los recursos naturales y bienestar animal; Ayudas a inversiones con objetivos ambientales en transformación, comercialización y/o desarrollo de productos agroalimentarios, por las inversiones en mejora de la eficiencia energética con fines principalmente ambientales, en la valorización de residuos y materiales de origen agrícola ganadero para aumentar la autosuficiencia energética y para la adopción de fuentes renovables de energía en la industria; Ayudas a inversiones en infraestructuras de regadíos con objetivos ambientales, por fomentar el uso de fuentes de energías renovables y mejorar la eficiencia energética de las instalaciones (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], 2023).

Grandes ideas vienen con obligaciones importantes, la protección ambiental, el uso responsable de las nuevas tecnologías, y la estabilidad del patrimonio agrícola juegan un papel importante en la implementación de la APV, pues, al involucrar dos sectores relevantes para la subsistencia humana debe priorizarse su investigación. La Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética ya sienta un punto de partida para proyectos a gran escala, resaltando el hecho de la compatibilidad con la preservación ambiental y del territorio. En el artículo 25— despliegue de energías renovables y protección de valores ambientales—ya nos toma como punto de partida la verificación de zonas sensibles ecológicamente, previo al despliegue de plantas renovables. En el artículo 24—Protección de la biodiversidad frente al cambio climático—habla sobre la importancia de proteger los suelos agrícolas, pues el papel frente a la mitigación y adaptación al CC es indispensable, entre otras, que básicamente nos brinda antecedentes para proyecciones responsables.

2.2.2. Directrices de la Comunidad de Madrid

Bajo la premisa de que la transición energética "debe realizarse con criterios de equilibrio, rigor y adecuada ordenación del territorio" (Comunidad de Madrid, 2026), es claro que prioriza la protección de los suelos agrícolas y de importancia ambiental, y, basados en esto la Comunidad de Madrid (s.f.) ha definido algunos criterios de implantación por medio de la metodología de Cartografía Sintética, estableciendo un límite técnico de ocupación del suelo del 4% por municipio para el despliegue de proyectos PV, con la finalidad de proteger y evitar la pérdida de los suelos productivos y la saturación en el paisaje madridleño. Ahora bien, ¿Qué factores se deben tener en cuenta en esta limitación para el despliegue de la APV en suelo madridleño? La Ley 9/2001establece algunos lineamientos importantes para basar un proyecto APV, entre estos se encuentra el artículo 151, el cual decreta que cualquier instalación energética o que no sea propia de explotación agrícola o ganadera requerirá una declaración y licencia previa de interés general por la administración competente, es decir, soportes para la ejecución del proyecto; el artículo 16 comprende los terrenos que deben ser excluidos para ejercitar una actividad como la APV, entre estos están aquellos que tengan valor natural, paisajístico, cultural, científico, histórico o arqueológico, y que por su parte estén sujetos a algún régimen de protección en la actividad sectorial; el artículo 27 instaura que los propietarios de los suelos agrícolas, en este caso, tienen el derecho de disfrutar y disponer de estos terrenos sin perjudicar la naturaleza de este, por lo que la APV es una base sólida para la multifuncionalidad del suelo; por último, el artículo 38 constituye la exigencia de armonizar la estructura con el entorno en donde se implante, factor importante en la salvaguarda ambiental.

Por otro lado, es importante tener en cuenta la Red Natura 2000—tenida en cuenta en la limitación del 4%—, ya que esta es "una red ecológica europea de áreas de conservación de la biodiversidad. Consta de Zonas Especiales de Conservación (ZEC) establecidas de acuerdo con la Directiva Hábitat y de Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) designadas en virtud de la Directiva Aves." (MITECO, s.f.), y la cual es imperturbable ante cualquier tipo de actividad que la impacte negativamente, pues asegura la supervivencia ecológica de fauna y flora española. Además, la Comunidad de Madrid (2024) clasifica los usos de suelo del territorio, entre estos los de protección agrícola, determinando terrenos aptos para la agronomía y en donde no se produzca un riesgo de degradación a largo plazo, lo clasifica en 7 tipos de superficies:

Tabla 1. Usos del Suelo, Comunidad de Madrid

Clase	Capacidad Productiva
2	Excelente
3	Moderada
4	Severa
5	Muy Limitada
6	Inadecuada para cultivo
7	Extrema
8	Sin valor agrícola

Tomado de: Comunidad de Madrid, 2024.

Así mismo, existen terrenos para el despliegue responsable de las renovables, las llamadas Zonas de Aceleración Renovables (ZAR), en donde la capacidad de acogida para la integración de energías descarbonizadas es mayor. En el Real Decreto-Ley 4/2026 se establece la necesidad de que cada administración debe identificarlas, y para la Comunidad de Madrid (2024) las ZAR abarcan este 4% mencionado anteriormente. La propuesta del mapa de idoneidad para la APV se soporta bajo este panorama, permitiendo revalorizar las áreas inicialmente consideradas "de exclusión", y transformándolo en un nuevo sistema de producción dual eficiente para la comunidad.

Por otro lado, es importante la implantación de un proyecto APV como cualquier otro de autoconsumo, teniendo en cuenta los factores de "con excedentes" o "sin excedentes" que van a derivar en distintas exigencias. La instrucción de la Dirección General de Descarbonización y Transición Energética (Comunidad de Madrid, 2022) dicta procedimientos administrativos importantes, sin embargo, también contiene definiciones técnicas y requisitos de suelo relevantes para la implementación de un sistema APV, entre estos están: los proyectos energéticos en los suelos no urbanizados, independientemente de la potencia instalada, tienen la obligación de tramitar los permisos de acceso y conexión a la red; según la producción energética se dicta la entidad con la que se debe tramitar dicha documentación; además, requisitos importantes como dispositivos anti vertido para instalaciones sin excedentes, o el Registro de Instalaciones de Producción de Energía Eléctrica para instalaciones con excedentes y su incorporación en el mercado energético. Las ayudas del gobierno también vienen de la mano de los proyectos APV, en el extracto de la Resolución del 18 de diciembre de 2025, establece incentivos importantes para el desarrollo de estos proyectos innovadores, que seguramente aumentarán a medida que se estudien e implanten más este tipo de tecnologías en el país (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2025)

2.3. Casos de éxito y referentes.

Es importante validar la viabilidad de la tecnología APV en la Comunidad de Madrid iniciando con un análisis de los proyectos desarrollados con éxito en la búsqueda de la rentabilidad energética y la productividad agrícola (Zahrawi & Aly, 2024). Esto servirá como referente para la definición de los parámetros de diseño y los indicadores de rendimiento.

2.3.1. Referentes internacionales

Un proyecto con gran relevancia mundial es el proyecto piloto de Heggelbach, supervisado por ISE. Allí, se instalaron paneles bifaciales de una altura de 5 metros sobre cultivos de trigo, patatas y trébol. Se demostraron resultados impecables, la eficiencia del uso del suelo (LER) mostró un 186% luego de haber sufrido condiciones de sequía durante años, esto demuestra como el sombreado que se proyecta por la estructura de los paneles genera una reducción frente al estrés térmico que pueden experimentar las plantas, ayudando así a conservar las condiciones adecuadas.

Por otro lado, algunos proyectos ejecutados por *Insolight* en distintas partes del mundo ha resaltado, con éxito, el provecho que se puede conseguir en una hibridación entre los cultivos y distintas capacidades instaladas de módulos fotovoltaicos, yendo desde plantas ornamentales hasta bayas, frutas o verduras. Junto a distintos socios se enfocan en sacar el mayor beneficio de cada hibridación, realizando diseños diferentes para cada una de las exigencias agrícolas. Para el desarrollo de estos es importante resaltar lo fundamental que es la colaboración entre distintos socios para el progreso de esta tecnología, monitorizando las condiciones tanto de las plantas como de la producción energética.

Se desarrollan distintas soluciones para las necesidades del cultivo, una de ellas es el desarrollo del Hardware modular *Insolagrin*, que permite la adaptación estructural a las necesidades del cultivo, integrando sensores micro climáticos para la optimización agrícola, además de opciones como redes de granizo, pantallas de sombreados y canalones para la protección de las plantas; por otro lado, el software *insoinsights* de predicción se diseña la instalación con la finalidad de garantizar la luz necesaria para las plantas, así mismo, permite predecir las fechas de cosechas, envía alertas de condiciones climáticas, recopila datos en tiempo real para la toma de decisiones inmediatas, entre estas la dirección del sombreado dinámico; por último, se da soporte a los proyectos con la parte documental, dando cumplimiento con los marcos regulatorios para la compatibilidad de usos del suelo, permitiendo la transición adecuada al doble propósito del proyecto sin llegar a comprometer el uso agrícola, al cual le llaman *insoservices* (Insolight, 2026).

Unos de los proyectos que se destacan dentro de esta compañía son los ejecutados en Conthey, Suiza, allí se ha podido estudiar el beneficio que trae la implementación de la hibridación cultivo-energía. Dentro de un piloto de cuatro años se estudió, analizó y optimizó 165 metros cuadrados de un cultivo de frambuesas (2020), con la inclusión de fresas en 2022, en macetas dentro de una cubierta de módulos solares translúcidos, basados en la tecnología de micro seguimiento óptico (ajuste dinámico de luz) con la finalidad de optimizar la fotosíntesis y convertir el exceso de luz en electricidad (Insolight, 2025). Esto ocurre por las condiciones que se generan por este tipo de módulos, que según Jocelyn Wildmer, en una entrevista realizada en la Universidad de Bern (2023) afirma que “los paneles solares translúcidos utilizados en el proyecto en el que estoy trabajando constan de dos capas. Una capa es dinámica y se puede mover para permitir que los rayos del sol lleguen a las plantas o no. Esto nos permite bajar la temperatura a nivel de planta. El objetivo es generar energía renovable manteniendo o incluso aumentando la calidad y cantidad de los frutos cosechados”.

Es importante mencionar que la sinergia entre distintas corporaciones permitió los avances que la empresa hoy resalta, una muestra de esto es el proyecto en Valais, Suiza, de cultivos de manzanas, peras y albaricoque en 4000 metros cuadrados, con una capacidad de 242 Wp y una producción de 300 MWh anuales (Insolight, 2025). Allí se realiza la distribución de la energía producida a su principal distribuidor de productos agrícolas. Esta instalación cuenta con paneles opacos y semitransparentes, demostrando

la adaptabilidad de los sistemas AGPV, los cuales son acompañados por lonas y redes en el pitch de los paneles para protección de las plantas frente a granizo, lluvias y heladas. En la ilustración 5 se puede observar el sistema planteado.

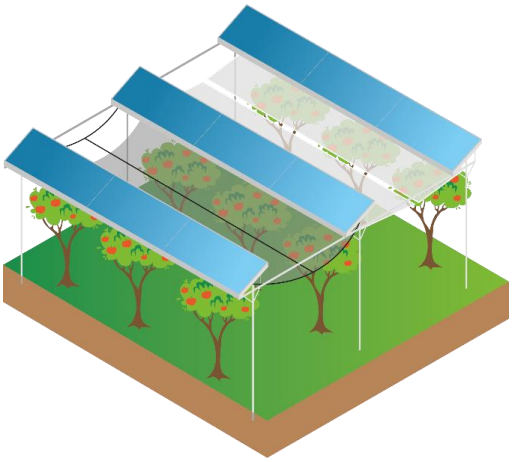


Ilustración 5. Ejemplo de implementación de la solución para huertos.

Tomado de: Insolight, 2026.

Por otro lado, el uso de la tecnología THEIA (Translucency and High Efficiency in Agrivoltaics) es resaltada para su implementación junto a cultivos de frutos rojos. Esta implica el "uso de una matriz densa de lentes que, a modo de pequeñas lupas, concentran la radiación solar directa en pequeñas células fotovoltaicas de alta eficiencia" como afirma López Luque y Ramírez Faz (2023) en su estudio "Consideraciones para la implantación del modelo agrivoltaico", permitiendo el paso de la radiación difusa para que sea aprovechada directamente por el cultivo y la directa sea enfocada a la producción eléctrica en estos espacios. A continuación, se observa el comportamiento anteriormente descrito.

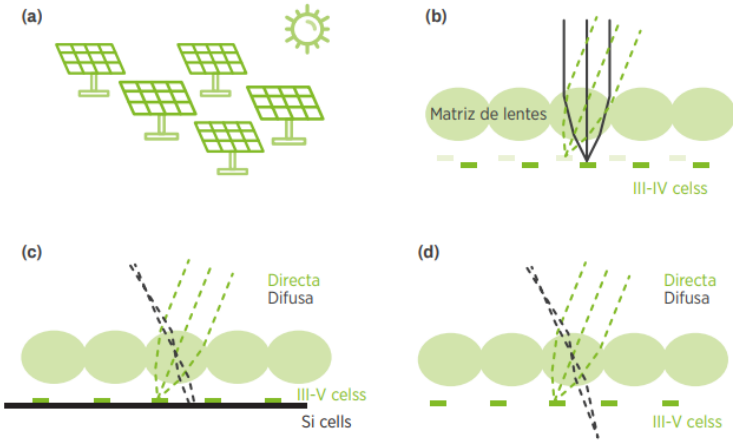


Ilustración 6. Paso de la radiación difusa con la tecnología THEIA.

Tomado de: López Luque y Ramírez Faz, 2023.

Configuración exitosa y que continuó desplegándose por esta compañía alrededor de Europa. Instalaciones en Francia de 145 kWp y 10.2 kWp en St-Livrade-sur- Lot, 300 kWp en Allemant, 160 kWp en Uchaux y 190 kWp en Sames; 10 kWp en Piedmont, Italia; 10 kWp en Enspijk, Países Bajos; demuestran lo efectivo que llega a ser el sistema para los frutos rojos.

2.3.2. Referentes nacionales

El futuro está escribiéndose la APV como mediadora entre los conflictos por el uso del suelo es un hecho, en los últimos años España ha optado por asegurarse de su adecuada implementación. Estudios y planes piloto empiezan a encaminarse con pasos firmes, a lo largo de las regiones se crean e implementan proyectos importantes para la consagración de una línea clara hacia la polifuncionalidad de los suelos. Dentro de España se destacan iniciativas adaptadas a los climas mediterráneos, el proyecto Winesolar de Iberdrola, en Toledo, se ubica en Guadamur, zona limítrofe con Madrid, esta planta de 40 kW es pionera en territorio español en la incorporación de seguidores inteligentes. Estos se ajustan acorde a las necesidades del viñedo, reduciendo la evaporación y controlando la maduración de las uvas (Iberdrola, 2024). Así mismo, Iberdrola (2024) ha buscado desplegar plantas APV a lo largo del territorio, en 2024 anuncia la construcción de un proyecto en Álava, País Vasco, de 910 kW y con propósitos I+D, integrando la tecnología ya estudiada en los viñedos y la integración de la Inteligencia Artificial (IA), buscando optimizar la posición de unos módulos bifaciales a 4,1 metros de altura y 700 Wp cada uno, conectados a un inversor de 750 kWn y almacenamiento de 2 horas y 240 kWh, con la búsqueda de un objetivo impulsador de la agricultura ecológica a futuro.

Distintas empresas han apostado por la investigación de estas nuevas ideas, y por ser nuevas representan un campo libre para pruebas, investigaciones e involucración de distintos actores. Endesa (2023) apuesta por una planta APV en Totana, Murcia, integrando en 150 ha la producción de alcachofas y brócoli bajo estructuras fijas. Ubicada en suelos afectados por la explotación masiva de cultivos—3 y 4 cosechas anuales—, y el uso de medidas como pesticidas y plásticos para sostener un rendimiento positivo del sector, han desatado preocupaciones en la comunidad por la contaminación de los suelos, por lo cual el proyecto se basa en medidas de manejo ambiental, técnico y social importantes: “se estableció un convenio con un ganadero local para que sus ovejas pasten dentro del recinto, un binomio muy positivo; Su ubicación está próxima a la subestación eléctrica donde descarga la producción, todo por línea soterrada, crearon un corredor ecológico dentro de la instalación sin presencia de paneles que favorece a la fauna, en los terrenos se ha respetado la nivelación del suelo haciendo que el agua de lluvia se filtre al acuífero evitando pendiente que favorezca la escorrentía, junto a la valla cinegética perimetral se han plantado especies vegetales autóctonas, con el fin de crear una pantalla verde que generará varios beneficios, entre ellos atrapar el polvo que se produce por el labrado de las tierras colindantes.”.

El estudio es muy importante, pero el desarrollo de las ideas lo es aún más cuando se trata de desafíos como la APV. Existen distintas empresas que han desarrollado distintos avances para una implementación exitosa de esta hibridación (APV), ya hemos visto cómo se implementa en proyectos piloto con Iberdrola y la implementación de su software y su infraestructura, o la experimentación de Endesa con medidas ambientales y sociales a resaltar. Ahora, el complemento entre tecnologías será lo más relevante cuando se desplieguen los sistemas, es por esto por lo que se presentan algunos avances en materia APV a continuación. Onyx Solar (s. f.) en la realización de proyectos de I+D+i en Castilla y León para 2016 desarrolló un invernadero PV autosostenible, por medio de vidrios PV que abastecen la microrred que lo conforma, proyecto concluido, pero basta para decir que las posibilidades son amplias (Ilustración 7).



Ilustración 7. Invernadero Fotovoltaico Onyx Solar.

Tomado de: Onyx Solar, s. f.

Soltec (s. f.) con los sensores *AgriSun* que se adaptan al campo, dependiendo de las necesidades agrícolas, exponen tres modos distintos: "Modo Cosecha, paso libre de maquinaria; Modo Cultivos, luz optimizada para plantas; y Modo Ganadería, seguridad para los animales.". Intecsa Solar (2022) ya propone estructuras adaptables a distintas necesidades del agricultor, desde cultivos con pasos de maquinaria significativos hasta ganadería, flexible ante los requerimientos (Ilustración 8 y 9).



Ilustración 8. Estructura APV Intecsa Solar, paso de maquinaria.

Tomado de: Intecsa Solar, 2022.



Ilustración 9. Estructura APV Intecsa Solar, ganadería.

Tomado de: Intecsa Solar, 2022.

La ciencia y la investigación siempre serán un pilar, por lo que vale la pena repasar algunos estudios realizados bajo distintos escenarios APV. En Almería, en la España del sur, se realiza una implementación de estas soluciones sobre climas mediterráneos, estudiando como los módulos actúan como protecciones frente al estrés térmico. La estabilidad de los cultivos se vuelve el factor más importante cuando se discute el CC; se encontraron varios resultados, tanto positivos como negativos, y, los tomates estudiados bajo el invernadero PV los más limitados, el rendimiento descendió en un 15% en las zonas de sombreado del 30% y un 26% en las zonas del sombreado del 50%; los frutos fueron 20% menos desarrollados en ambas zonas; la maduración se retrasó 9 días en promedio; los azucares encontrados en los frutos fueron menores; el punto de saturación para el desarrollo de la fotosíntesis aumentó, derivando el decaimiento; la forma de la planta también se modificó, siendo más alta y de menor diámetro; sin embargo, la compensación viene con el sistema, en este tipo de instalaciones se evalúa que los beneficios sean mayores cuando el sistema cumpla el año, sosteniéndose por ventajas anuales, siendo la producción energética la que compensa la producción agrícola; y concluye que mientras se optimice el sombreado de las plantas para no comprometer la

radiación fotosintética de estas se puede llegar a optimizar también el cultivo (Kujawa et al., 2024). Otro estudio realizado alrededor del 2018, desarrollado por Aroca-Delgado et al., en la misma locación, y siendo el punto de partida del anterior, menciona varios puntos clave, al utilizar módulos flexibles en el sistema no solo facilita la integración a la estructura, además de esto, alcanzan LER de 1,42, indicando una ventaja importante sobre el monocultivo y la electricidad, manteniendo tanto la fruta, como la electricidad, dentro de los estándares comerciales óptimos.

2.4. Aplicación de los SIG en la evaluación de idoneidad para sistemas APV

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una herramienta fundamental para la planificación territorial de energías renovables, pues permiten integrar, cruzar y ponderar múltiples capas de información geoespacial de forma simultánea y reproducible. Su capacidad para representar visualmente la distribución espacial de variables físicas, agrícolas, ambientales e infraestructurales sobre un mismo territorio los convierte en el instrumento idóneo para la toma de decisiones en proyectos que, como la APV, involucran la coexistencia de múltiples usos del suelo (Dere et al., 2023). En términos generales, un SIG es definido como un sistema espacial que crea, gestiona, analiza y cartografía datos, organizando capas de información para visualizar mapas y construir escenas tridimensionales que facilitan la comprensión del territorio (ESRI, 2023).

En el ámbito de las energías renovables, la combinación entre los SIG y los métodos de decisión multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) ha demostrado ser la aproximación metodológica más utilizada para la evaluación de idoneidad territorial, pues mientras los SIG aportan la base de datos espacial, los métodos MCDM permiten asignar pesos a cada criterio capturando tanto la evidencia científica como la incertidumbre inherente a la toma de decisiones (Dere et al., 2023). Entre las técnicas MCDM, el Proceso Analítico Jerárquico —AHP, por sus siglas en inglés— destaca por su facilidad de uso, su capacidad de integrar la consistencia de los evaluadores y su amplia aplicación en estudios de selección de emplazamientos para instalaciones solares (Uyan, 2013; Colak et al., 2020). No obstante, la literatura ha avanzado hacia variantes que incorporan lógica difusa —FAHP— para representar mejor la subjetividad y la imprecisión en los juicios de los expertos (Noorollahi et al., 2016).

A pesar de la madurez metodológica en el campo de la energía solar fotovoltaica convencional, la aplicación de los SIG específicamente para la evaluación de idoneidad de sistemas APV constituye un campo emergente con estudios aún escasos y geográficamente dispersos (Vitale et al., 2026). Los trabajos existentes pueden agruparse en dos líneas principales: aquellos que evalúan el potencial territorial disponible para APV mediante análisis de disponibilidad del suelo, y aquellos que integran criterios agronómicos, físicos e infraestructurales en modelos ponderados para la producción de mapas de idoneidad.

2.4.1. SIG como herramienta de planificación territorial energética

Un desarrollo analítico importante para la implantación de sistemas APV, realizado por medio de SIG, fue documentado para Sudáfrica por Brent et al. (2024), país con más del 79% del territorio destinado a usos agrícolas y un recurso solar superior a 1.600 kWh/m^2 anuales en más de un 80% de su superficie. Este selecciona criterios como la disponibilidad del suelo agrícola y pendientes inferiores a 2° para minimizar costos de construcción, además, analiza más de 31 millones de hectáreas, las cuales distribuye en tres usos principales: praderas para ganadería extensiva, cultivos de cereal y producción frutícola. Los resultados demuestran que el potencial se concentra en las zonas de pastoreo y cultivos de cereal, en provincias donde el estrés térmico es una constante y los módulos APV deslumbran una ventaja agrícola directa. Esta investigación implanta un punto de partida interesante, pues cruza información de usos del suelo agrícolas y el recurso solar disponible como condición necesaria, pero no suficiente, para una evaluación de idoneidad rigurosa para la APV, requiriendo criterios infraestructurales y normativos para un balance adecuado.

En este mismo camino se direccionan Vitale et al. (2026) cuando proponen una metodología basada en SIG para la evaluación del impacto agronómico de la APV sobre praderas en la región de Valonia, Bélgica. Integra el modelo de simulación de cultivos Gras-Sim en una herramienta de código abierto (PASE). Allí, analiza 139 regiones mediante algoritmos de trazado de rayos, evaluando cuatro configuraciones de instalación—dosel, vertical y dos sistemas orientados al sur con distintas alturas—con tasas de cobertura del suelo (GCR) entre 0,2 y 0,5. Los resultados arrojaron resultados interesantes, indicando que las configuraciones verticales y de dosel, especialmente en suelos de baja profundidad radicular, pueden mantener o superar el rendimiento forrajero respecto a zonas sin paneles, esto, debido a la reducción en la evapotranspiración durante los periodos secos. El aporte de esta investigación radica en cómo el diseño técnico de la instalación actúa con las condiciones del territorio, constituyendo una referencia metodológica para la selección de configuraciones adaptadas para cada zona.

Ahora bien, con un enfoque más próximo a esta investigación se añade el estudio realizado por Dere et al. (2023), en donde se analiza el potencial de los sistemas APV en tres provincias de Turquía, caracterizadas por tener alta producción agrícola—Konya, Ankara y Şanlıurfa—mediante un modelo GIS-FAHP (método multicriterio). Su metodología integra factores de evaluación organizados en tres dimensiones: el recurso solar, medido a través de la irradiación horizontal global (GHI); las características físicas del territorio, incluyendo la pendiente, la orientación y la cobertura del suelo; y la proximidad a infraestructuras, considerando carreteras, líneas de energía, conducciones de gas y fallas sísmicas. Para realizar el análisis detallado asigna pesos a cada uno de estos criterios, al potencial solar (30%), seguido del aspecto (16%), la cobertura del suelo (16%) y la pendiente (14%). Resultando en un mapa de idoneidad para cada una de las provincias y generado a partir de la superposición ponderada en ArcGIS, permitiendo la identificación de los distritos con mayor capacidad de acogida para la APV (Ilustración 10). Este estudio es un referente metodológico directo para este trabajo, al combinar SIG

con MCDM para producir un mapa de idoneidad territorial específico de la APV, aunque no esté enfocado en evaluar las aptitudes de los suelos como un criterio diferenciador.

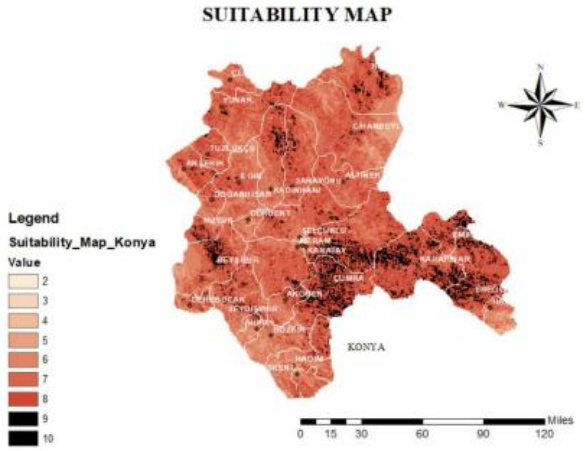


Ilustración 10. Mapa de idoneidad para Konya

Tomado de: Dere et al. (2023)

En síntesis, los antecedentes expuestos anteriormente demuestran que, aunque la APV juega un papel importante en la descarbonización del sector energético, y la convivencia de distintos sectores productivos, deberá abrirse camino en medio de territorios y políticas distintas para cada Comunidad, ciudad, país o continente. Un ejemplo claro es la ordenación del territorio, la saturación paisajística y de confrontación entre los usos del suelo en la Comunidad de Madrid ha hecho que se instaure un límite del 4% para las energías renovables, pues tiene prioridad la protección del territorio en sus suelos de alto valor cultural y agrícola. Esta situación justifica la necesidad de este estudio, permitiendo transitar entre la visión de la exclusión y su trascendencia hacia la integración de la polifuncionalidad del terreno, por medio de una herramienta cartográfica en donde se logre identificar la coexistencia posible, y óptima, para la resiliencia madridleña frente al CC.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Desarrollar un mapa de idoneidad cartográfico para la evaluación del despliegue de los sistemas APV, reflejando el análisis multicriterio asistido por los SIG y PyGIS, con la finalidad de identificar y cartografiar las zonas óptimas para este en la Comunidad de Madrid, garantizando el cumplimiento de las restricciones legales y la preservación de los suelos agrícolas y de interés ambiental; complementando el análisis territorial con la estimación del potencial energético de las zonas identificadas mediante la simulación con PVSyst, como herramienta de apoyo para la validación técnica suplementaria del estudio geográfico. El mapa resultante se concibe como una herramienta de preselección territorial que apoya la toma de decisiones, y no como el criterio único o determinante para la implantación de proyectos concretos.

3.2. Objetivos específicos

Con la finalidad de alcanzar esta meta se plantean cinco objetivos específicos:

- Identificar las zonas protegidas ambientalmente de la Comunidad de Madrid, y otras limitaciones legales existentes como factores de exclusión para la energía solar.
- Evaluar la capacidad agrícola de los suelos madridleños por medio de la clasificación ya existente realizada por el IDEM, priorizando las clases 3 y 4 como las más aptas para la coexistencia de ambas producciones.
- Contrastar la cartografía oficial del límite del 4% de la Comunidad de Madrid con la capacidad agrícola del territorio, identificando municipios saturados en donde la APV se presenta como la solución viable para la expansión renovable.
- Cartografiar los niveles de idoneidad territorial, por medio de una herramienta visual que facilite la toma de decisiones para el futuro despliegue del potencial APV.
- Estimar el potencial energético de los sistemas APV en las zonas de mayor idoneidad mediante el software PVSyst, con la finalidad de evaluar técnicamente los resultados cartográficos, y, así, acercarse al rendimiento energético que se espera en las condiciones climáticas y agrológicas de la Comunidad de Madrid.

4. METODOLOGÍA

En este estudio se realiza el análisis desde la Evaluación Multicriterio (EMC), con el objetivo de que los datos obtenidos de diferentes capas espaciales den a conocer una perspectiva inicial de los sistemas APV, y así, conocer el potencial de despliegue en la Comunidad de Madrid. Esto será llevado a cabo con el Software QGIS, el cual permitirá, de una forma visual, analizar los datos espaciales relevantes para este estudio, y mencionados más adelante. Así mismo, con la consola integrada de Python (PyGIS), y una vez esté desarrollado el análisis de idoneidad para los sistemas APV, servirá como soporte para el traslado de los datos cartográficos a datos numéricos, para una lectura más rigurosa de estos.

Para llegar a esto se evaluaron cinco fases. Como se muestra en la ilustración 11, estas son: Fase 1: Recopilación de la Información; Fase 2: inventario y normalización de datos; Fase 3: Análisis de la situación inicial en la Comunidad de Madrid mediante PyGIS; Fase 4: Generación del mapa de idoneidad de la APV en la Comunidad de Madrid y Análisis; Fase 5: Validación energética en las zonas identificadas como idóneas por medio del software PVSyst. A continuación, se encontrarán estos pases detallados.

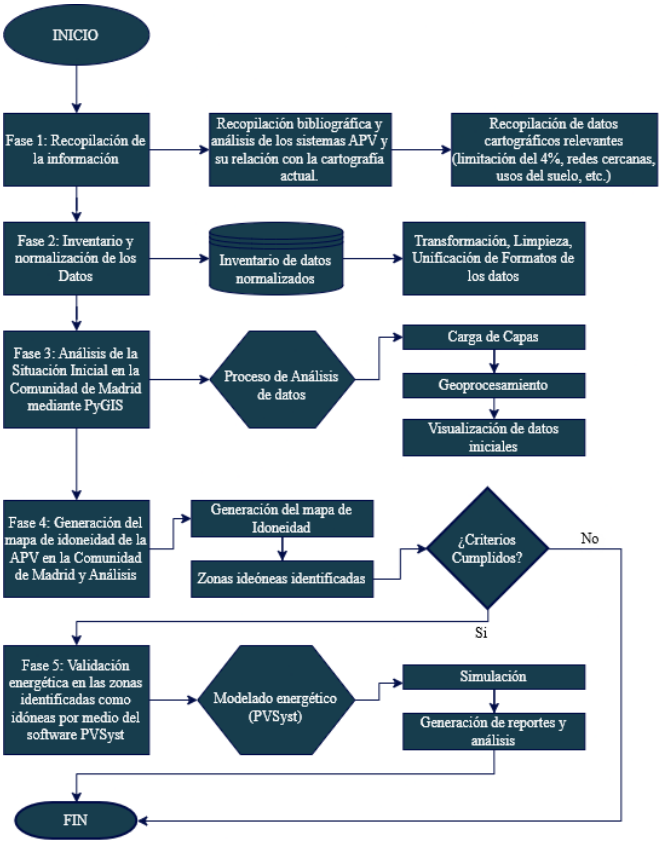


Ilustración 11. Diagrama de flujo, metodología.

Elaboración propia.

4.1. Fase 1: Recopilación de información

Es importante aclarar que para el desarrollo del documento se consultaron distintas páginas web oficiales de empresas reconocidas en el sector eléctrico, entidades con renombre internacional, bases de datos oficiales de la Comunidad de Madrid y visores online de cartografía madridleña. Por otro lado, para la documentación de estudios científicos relacionados con la APV se recopiló información de distintas bibliotecas virtuales y redes sociales científicas. La búsqueda se limitó a artículos en español e inglés, y algunos de estos accesos se obtuvieron desde el buscador de la biblioteca virtual de la Universidad Europea y Google académico, y, por otro lado, se utilizó ResearchGate con soporte de la página web "Connected Papers" para encontrar correlaciones entre APV y SIG.

Como paso fundamental se inició con la consulta de información que permitiera reconocer el concepto de la APV, facilitar el estudio de los beneficios en la sinergia PV y agrícola, optando por las palabras clave: "Agrivoltaica", "Agrofotovoltaica", "Energía solar agrivoltaica", "Uso dual del suelo solar". En primera instancia se estudió la evolución tecnológica, como punto de partida para entender las ideas primordiales. Algunos autores, como Schindele, Akira Nagashima, o Adolf Goetzberger y Armin Zastrow, posibilitaron conocer los beneficios sinérgicos, y la estimación de otros datos relevantes como las configuraciones del sistema, tipos cultivos beneficiados, generaciones energéticas, ganancias económicas por la producción, balance económico entre energía y producción de alimentos, entre otros mencionados anteriormente, y que facilitan la toma de decisiones para la selección de datos para PVSyst y QGIS, como lo son los usos de suelo agrícola (viñedos y olivar) y la altura del sistema PV, por nombrar algunos.

Una vez obtenida la literatura se opta por estudiar la información relevante sobre el marco legal y regulatorio, iniciando desde la escala europea hasta la madridleña. Esto permite conocer el panorama de las zonas protegidas y su importancia, los usos del suelo y el papel que tiene la limitación del 4% para sistemas PV; el camino hacia la descarbonización y las metas planteadas para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU en cuanto a la transición energética y resiliencia frente al cambio climático a nivel local (España y la Comunidad de Madrid), y de alguna forma enmarcar el despliegue de la APV, y que al mismo tiempo se logre retirar el marco en que se encuentran los sistemas PV en Madrid.

Seguido a este conocimiento obtenido, es importante conocer la existencia de empresas ya consolidadas para evaluar casos de éxito en generación y consolidación de sistemas, funcionando como referentes para este artículo y para líneas futuras, como la del despliegue del sistema. Por otro lado, al ser una tecnología de implantación reciente, sabíamos que se encontrarían estudios segmentados, y aparentemente escasos en el perímetro español, por lo cual contar con visiones internacionales y nacionales fue fundamental para enriquecer el estudio.

Finalmente, para concluir esta etapa, se optó por los estudios relacionados entre los SIG y la APV. La información en este punto fue más limitada, por lo cual se optó por incluir a la búsqueda estas palabras clave: “análisis de idoneidad APV”, “SIG y APV”, “evaluación APV con SIG”, “EMC y APV” y “Modelado geoespacial APV” en el buscador de ResearchGate y “Connected Papers”. Escogiendo así los estudios más próximos a la presente exploración.

4.2. Fase 2: inventario y normalización de datos

Para este punto fue relevante la consulta en los sitios web oficiales de la Comunidad de Madrid y en la plataforma de Infraestructura de Datos Espaciales de la Comunidad de Madrid (IDEM). Por otro lado, datos de elevación del terreno fueron obtenidos directamente de las librerías contenidas en QGIS, así como atlas globales que permitieron realizar la comparativa frente a fuentes como “PVGIS” o “Global Solar Atlas” para la escogencia de los datos.

Con la información recopilada se establece la línea base del proyecto, con la cartografía oficial de la Comunidad de Madrid como papel fundamental. En primer lugar, se descarga la capa del límite del 4%, permitiendo la visualización y cuantificación de disponibilidad del suelo para acoger sistemas PV. Seguido a esto, en el portal del IDEM se consulta la capa de uso del suelo agrícola, el cual clasifica el suelo según el potencial productivo (Clases 2 a 8), así como las capas de Red Natura 2000, necesarias para las restricciones ambientales. De esta misma forma se obtienen los datos de las subestaciones y líneas de evacuación energética existentes, asegurando el rigor de la información para el desarrollo de la investigación.

Por otro lado, los modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) fueron descargados a partir del complemento SRTM Downloader, y también se utilizó QuickOSM para la descarga de los datos de las subestaciones, estas herramientas están integradas directamente en el software QGIS. Además, se realiza una comparación de los datos de irradiación solar de distintas fuentes en línea: PVGIS, Solar Global Atlas y el servidor API de QGIS que conecta con la NASA directamente. A partir de esta comparativa, se seleccionan los datos proporcionados por Global Solar Atlas, ya que brinda una resolución aproximada de 250m, siendo adecuada para los objetivos del estudio y la escala cartográfica del proyecto, y por su cobertura sobre el territorio peninsular, lo que permie una representación más precisa de la variabilidad de irradiación en la Comunidad de Madrid. A continuación, se resumen los datos empleados en el software:

Tabla 2. Resumen del Inventario de datos

Criterio	Capa	Fuente	Tipo de Dato	Resolución/Escala	Año
Radiación Solar (GHI)	Global Solar Atlas	Solargis, 2023	Raster	~250m	2023
Pendiente	DEM (STRM)	QGIS (STRM Downloader)	Raster	~30m	2014
Capacidad Agrológica	Clases Agrícolas	IDEM	Vector	1:50.000	2024
Red Natura 2000	Red Natura 2000	IDEM	Vector	1:50.000	2026
Subestaciones	Subestaciones Madrid	QGIS (QuickOSM)	Vector	1:50.000	2026
Líneas AT	Red_AT	CNIG	Vector	1:100.000	2021
Vías de Acceso	Vias Madrid	CNIG	Vector	1:100.000	2026
Suelo Urbanizado	Madrid_zonaurbanizada	IDEM	Vector	1:50.000	2016
División Municipal de Madrid	Municipios_Madrid	CNIG	Vector	1:100.000	2026

Elaboración propia

Luego de la verificación de los datos geoespaciales, y a partir de la revisión de la bibliografía plasmada en el índice 2, específicamente en el apéndice 2.4.1, se adopta la evaluación multicriterio asistida por SIG y PyGIS, tomando como referencia metodológica el estudio realizado por Dere et al. (2023), se incorporan las adaptaciones necesarias para el contexto normativo y territorial de la Comunidad de Madrid, y, se enriquece el modelo con la capacidad agrícola que caracteriza a la APV frente a la PV convencional. El modelo resultante integra siete criterios organizados en tres bloques, cuyos pesos han sido determinados a partir de la evidencia científica disponible (tabla 2).

El primer bloque es el físico-solar, agrupa tres criterios con un peso del 40% en total. La irradiación solar, tomada de Global Solar Atlas (Solargis, 2023), y medida en términos de GHI—por sus siglas en inglés— recibe el mayor peso del modelo: 25%. Su peso fue reducido respecto al estudio de Dere et al. (2023) —30%— dado que la variabilidad de irradiación en la Comunidad de Madrid es menor, y el área a evaluar es considerablemente menor, lo que reduce su capacidad diferenciadora entre zonas.

La pendiente recibe un peso del 10%, siendo, así mismo, un criterio de exclusión para valores superiores al 15% de inclinación, umbral establecido en el estudio de Schindele et al. (2020) y Weselek et al. (2019), en donde se posiciona como límite para el paso de maquinaria agrícola en estructuras APV elevadas. La orientación, o aspecto del terreno, recibe el menor peso del modelo: 5%, justificado ya que gran parte del territorio madridleño corresponde a zonas de relieve suave, de baja variabilidad, contando así, con un poder discriminatorio limitado, a diferencia del contexto turco donde las diferencias topográficas cuentan con cambios más elevados (Dere et al., 2023).

El segundo bloque determinado es el agrícola, concentrando un 35% del peso total del modelo. Constituye la principal aportación diferenciadora de este estudio respecto a los referentes tomados. La capacidad agrícola del suelo, evaluada a partir de la clasificación oficial del IDEM (Comunidad de Madrid, 2024), recibe el segundo peso con mayor relevancia del modelo: 20%, priorizando las clases 3 y 4, siendo las óptimas para la hibridación APV. Esta decisión es fundamentada sobre el estudio de Dupraz et al. (2011), en donde se demuestra que el LER cuenta con mayor favorabilidad en suelos con limitaciones moderadas, soportado además porque el sombreado parcial de los módulos compensa el estrés hídrico del cultivo, además, en Schindele et al. (2020), se evidencia que los beneficios sinérgicos de la APV son más significativos en suelos que se benefician del microclima generado por la estructura. La exclusión de zonas protegidas bajo la Red Natura 2000 recibe un peso del 15%, operando como criterio principal de exclusión con la base legal explícita en la Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética y en la Directiva RED III (Parlamento Europeo, 2023), garantizando la coherencia entre el análisis espacial y el marco normativo.

El bloque final agrupa los criterios asociados a la infraestructura, y representa un 25% del modelo. La proximidad a subestaciones eléctricas y líneas de evacuación existentes cuenta con un 15%, superior al asignado en el estudio turco anteriormente mencionado (12%), argumentado sobre la presencia de infraestructura de generación en la Comunidad de Madrid escasa—donde apenas el 0,2% de la potencia fotovoltaica instalada en España corresponde a este territorio (Red Eléctrica de España, 2026)—, esto, hace especialmente relevante la proximidad a puntos de conexión para la viabilidad de estos nuevos proyectos. Finalmente, la proximidad a vías de acceso recibe un peso del 10%, superior al del modelo referente (4%), debido a la doble función que se adquiere en un contexto APV: el mantenimiento de los módulos PV y la operación agrícola continua con la maquinaria lo posiciona como una exigencia técnica específica de esta tecnología, y que se encuentra descrita por Schindele et al. (2020).

A continuación, en la tabla 3 se sintetizan los criterios, sus pesos y las fuentes de referencia mencionados anteriormente.

Tabla 3. Criterios de evaluación y pesos del modelo de idoneidad APV.

	Criterio	**Peso (%)**	**Referencia**
Físico-Solar	Radiación Solar (GHI)	25	Dere et al., 2023; Brent et al., 2024
Físico-Solar	Pendiente<15%	10	Schindele et al., 2020; Weselek et al., 2019
Físico-Solar	Orientación	5	Dere et al., 2023
Agrícola	Capacidad agrícola (clases 3 y 4)	20	Dupraz et al., 2011; Schindele et al., 2020; IDEM, 2024
Agrícola	Exclusión Red Natura 2000	15	Ley 7/2021; Parlamento Europeo, 2023
Infraestructura	Proximidad a subestaciones/líneas	15	Dere et al., 2023; REE, 2026
Infraestructura	Proximidad a vías de acceso	10	Schindele et al., 2020; Dere et al., 2023
Total		100	

Nota: *los pesos parten de los valores reportados en la literatura de referencia (principalmente Dere et al., 2023) y se ajustan mediante el criterio del investigador para adaptarlos al contexto normativo, territorial*

y de escala de la Comunidad de Madrid, según se argumenta para cada criterio en el texto. Esta combinación de evidencia bibliográfica y juicio informado se reconoce como limitación en el apartado 4.6 y se plantea como línea de mejora (validación por consulta a expertos) en el apartado 11.1.3. Fuente: Elaboración propia.

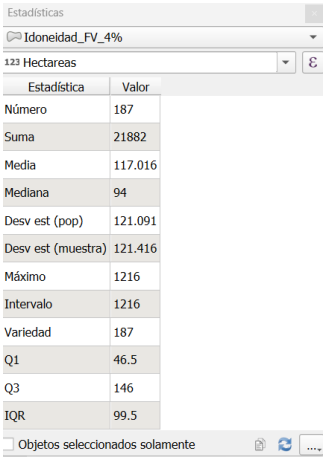
Con las capas ya identificadas y los criterios establecidos, se prepara cada variable y mapa para ser integrado y transformado para el mapa objetivo de Idoneidad APV, las variables se reclasifica en una escala de 0 a 1; las variables con categorías, como la capacidad agrícola, se ordenan según su aptitud; y, las capas de exclusión, como la de Red Natura 2000 y suelo urbanizado se codifican como máscaras binarias, es decir, que cuenten únicamente con valores de 0 (cuando no se excluye) y 1 (cuando se excluye esta zona en el modelo). El procedimiento completo y los detalles serán incluidos en el apartado 6.1-6.3.

4.3. Fase 3: análisis de la situación actual mediante PyGIS

Esta fase se desarrollará en QGIS, se elaborará un script en Python (Anexo C. 4) en donde se posibilita el análisis por territorio para el despliegue de los sistemas PV convencionales. El código se estructura en los siguientes pasos:

Primero se verificó la coincidencia del sistema de referencia de coordenadas entre la capa vectorial de la restricción del 4% (Anexo 4, nombre de la capa: Idoneidad_FV_4%) y las del límite administrativo municipal descargado directamente de QGIS Quick OSM (nombre de la capa: Municipios_madrid). En caso de que el software encontrara alguna inconsistencia se aplica una reproeycción automática al sistema oficial local ETRS89 / UTM zone 30N (EPSG:25830) con el fin de asegurar la precisión en las mediciones. Luego de esto se llama a la herramienta *native: intersection*, la cual recorta el límite del 4% utilizando como máscara la delimitación de los 179 municipios de la Comunidad de Madrid, y se conserva el campo en donde se contiene el nombre del municipio (NAMEUNIT).

Es importante destacar la precisión metodológica que se debe tener cuando se maneja información cartográfica de partida, aunque hay anuncios institucionales del Plan de Protección del Paisaje de la Comunidad de Madrid en donde se establecen superficies preliminares de 320 km2 (Comunidad de Madrid, 2025), al llevar a cabo una evaluación geométrica directa sobre la capa cartográfica oficial, arroja una superficie vectorial bruta de 218,8 km2 como se muestra en la ilustración 12 (21.882 ha). Esta diferencia inicial responde a la eliminación de duplicidades, por medio de la herramienta “Disolver” en QGIS, y la exclusión de solapes geométricas de fondo.



Estadística	Valor
Número	187
Suma	21882
Media	117.016
Mediana	94
Desv est (pop)	121.091
Desv est (muestra)	121.416
Máximo	1216
Intervalo	1216
Variedad	187
Q1	46.5
Q3	146
IQR	99.5

Ilustración 12. Suma Hectáreas del límite del 4% en QGIS

Tomado de las estadísticas de QGIS

Para finalizar, con la geometría resultante de la intersección vectorial, el código calcula la superficie exacta de cada polígono, esto con la función $area (o el método ".area()" del entorno geográfico) y convierte los valores métricos a hectáreas (m^2 / 10.000). Luego, el algoritmo consolida la información y la exporta automáticamente en formato CSV, encontrándose de forma detallada en el Anexo 13, Tabla 22. A partir de esto, resulta un área útil total de 157 km^2 (15.700 ha) tras la sumatoria de la columna de datos en Excel.

4.4. Fase 4: Generación del mapa de idoneidad de la APV en la Comunidad de Madrid y Análisis

Con el territorio disponible delimitado en la fase 3 y las capas normalizadas en la fase 2, esta fase combina ambos datos obtenidos en dos partes: primero, la generación del mapa general de idoneidad para la Comunidad de Madrid; y, segundo, el análisis específico que cruza este mapa con el catastro agrícola para la priorización de las parcelas en las que se apoya la validación energética.

Ahora bien, con las capas normalizadas, para el primer punto, se aplica un análisis de superposición ponderada (Weighted Overlay o WLC) en el territorio de la Comunidad de Madrid, se integran los 3 bloques definidos. En el agrícola se priorizan las clases 3 y 4 de capacidad, pues se reconocen como óptimos para la incorporación de la APV para la hibridación. En la infraestructura se valora la proximidad que hay a subestaciones y líneas de evacuación ya existentes, con la finalidad de minimizar la creación de nuevas. En el criterio físico se exigen pendientes inferiores al 15%, pues es necesario para el paso de maquinaria agrícola y gestión e la escorrentía que se genera bajo los módulos.

El índice resultante (de rango 0-1) se reclasifica en distintas categorías de idoneidad (Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta), con los criterios de clasificación que se detallan en el apartado 6.6. Este mapa general permite localizar, a escala municipal y del propio cuadrante, las zonas con mayor potencial para APV (Tabla 16, Ilustración 17 y 18).

Complementario a esto, y con la finalidad de dar rigurosidad a la investigación se incluye una capa catastral del SIGPAC (Comunidad de Madrid, 2026), y se escogen dos cultivos dentro de las categorías de idoneidad obtenidas, priorizando en este estudio las capas de olivar (código SIGPAC OV) y viñedo (código SIGPAC VI). En cada capa de idoneidad se aplica la superposición espacial con las parcelas SIGPAC (Ver Anexo 10) filtradas en estos usos, en donde a cada parcela se le asigna la idoneidad correspondiente a su centroide, esto mediante un algoritmo en PyGIS (ver Anexo C.1). Este código hace una reproeycción de las capas al sistema EPSG:25830 (para que todas se encuentren en el mismo sistema de coordenadas), calcula el centroide de cada parcela y asigna un valor de idoneidad de la capa ráster correspondiente, lo cual se actualizará automáticamente.

Una vez cruzadas las capas se crea el mapa de priorización APV agrícola (Anexo 11), y cuyos resultados numéricos serán visualizados en la Tabla 17. A partir de estas capas creadas para VI y OV se seleccionan las coordenadas representativas para un viñedo, diferente para cada clase de idoneidad: Muy Alta, Alta y Media, con la finalidad de extraer coordenadas que reflejen una producción energética positiva y una posible hibridación frente al uso de suelo. Estas serán llevadas a cabo aleatoriamente con un algoritmo, y será descrito en la Fase 5, en la sección 6.8.

Con el mapa de idoneidad general y la priorización agrícola ya establecidos, la Fase 5 toma las coordenadas representativas como insumo para la validación energética mediante PVSyst.

4.5. Fase 5: Validación energética de las zonas óptimas mediante PVSyst

4.5.1. Planteamiento

Para realizar un contraste entre el mapa de idoneidad obtenido con datos de producción energética reales, se desarrolla una fase de validación con una simulación desarrollada con el software PVSyst (v8.1.4). El objetivo de esta fase no es dimensionar una instalación en concreto, sino comparar el comportamiento energético de un punto específico obtenido de la cartografía realizada en los puntos anteriores. Se tenderán en cuenta puntos representativos de las idoneidades: Muy Alta, Alta y Media. Además, se mantendrá el diseño de la estructura observado en la recopilación de la bibliografía del Estado del Arte (punto 2 del documento), y se mantendrán constantes la estructura, la configuración del sistema y las hipótesis de pérdidas en los tres puntos, cualquier aleación en los resultados de producción serán netamente atribuidos a las condiciones climáticas y del recurso solar de cada emplazamiento.

4.5.2. Configuración del sistema PV

Luego de seleccionar las zonas, por medio de la automatización en el PyGIS, con el script que aparece en el Anexo C.2, y que será explicado a profundidad en el punto 6.8, se emplea una configuración de sistema conectado a red idéntica en PVSyst con las siguientes especificaciones:

- **Módulo fotovoltaico:** genérico monocristalino de media célula bifacial ("Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial"), 550 Wp nominales, tecnología desde 2023.

- **Inversor:** genérico de 90 kWac, rango de tensión de entrada 180–1000 V, 2 MPPT, configurado con reparto de potencia nominal entre entradas ("Reparto de PNom en el inversor").
- **Campo fotovoltaico:** 180 módulos (10 strings de 18 módulos en serie), 99,0 kWp de potencia DC y 90,0 kWac de potencia AC, resultando en una relación DC/AC (Pnom ratio) de 1,10, próxima al valor objetivo de 1,15 empleado en la metodología; la diferencia se debe a la disponibilidad de potencias comerciales.
- **Meteorología:** serie TMY de PVGIS (API PVGIS-TMY), descartándose Solargis en este caso por requerir créditos de API de pago.

Los datos meteorológicos y de altitud/huso horario se importaron de forma independiente para cada emplazamiento a partir de sus coordenadas, garantizando que cada simulación refleje las condiciones locales reales (altitud entre 524 y 605 m, huso horario UTC+1 en cada uno de los casos).

4.5.3. Adaptación del sistema PV a una estructura APV

La estructura planteada en PVSyst se plantea como un conjunto tipo tablas, con sombreado cercano calculado según las cadenas de módulos, igual que en el punto anterior, esta es constante en las tres zonas, y se puede resumir de la siguiente manera:

- **Configuración:** 10 filas de 18 módulos cada una, orientación sur (acimut 0°) e inclinación de 20°.
- **Separación entre filas (pitch):** 12 m, equivalente a tres veces la altura de la estructura (4 m), siguiendo el criterio de Goetzberger y Zastrow (1982) para la convivencia de producción fotovoltaica y agrícola.

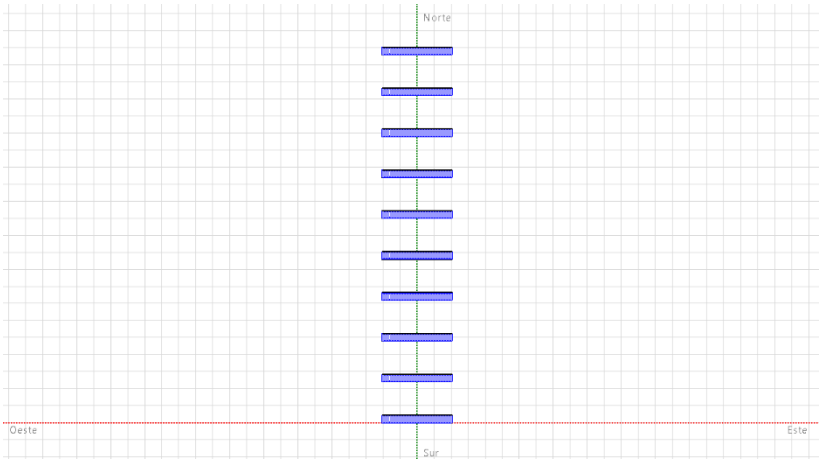


Ilustración 13. Vista Superior del Sistema PV
Tomada de la simulación con PVSyst

- **Altura de pivote (Z):** 4 m, dimensionada para permitir el paso de maquinaria agrícola bajo la estructura, basado en Schindele et al. (2020).

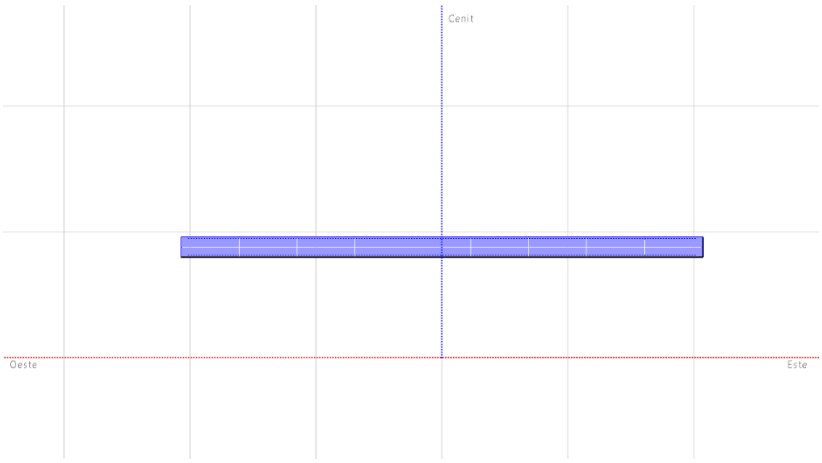


Ilustración 14. Vista Frontal del Sistema PV
Tomada de la simulación con PVSyst

- **Ratio de cobertura del suelo (GCR):** 19,2 %, resultante de la geometría anterior.

El cálculo del sombreado cercano con ayuda del software confirma la ausencia de sombreado directo en alturas desde los 30° a los 90°. Entre los 0° y 20°, con posiciones cercanas a un azimut de 0°, se obtienen factores de sombreados parciales. El factor de sombreado de la componente difusa es de 0,01, mientras que el factor del albedo fue de 0,364. Este último toma relevancia en el presente proyecto, ya que se busca contar con módulos bifaciales para el aprovechamiento de esta energía reflejada por el suelo, o incluso por el mismo cultivo.

Tabla 4. Tabla de factores de sombreado (lineal)

Altura **Azimut**	**90°**	**80°**	**70°**	**60°**	**50°**	**40°**	**30°**	**20°**	**10°**	**0°**
-180°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000
-160°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
-140°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
-120°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
-100°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
-80°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-60°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019
-40°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.248
-20°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.448
0°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.585
20°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.448
40°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.248
60°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019
80°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
120°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
140°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
160°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
180°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000

Elaboración propia, a partir de datos tomados en PVSyst

4.5.4. Parametrización de las pérdidas del sistema

Por otro lado, se emplearon los valores preestablecidos de PVSyst para las pérdidas del sistema. Sin embargo, y como se observa en la Tabla 5, algunos parámetros fueron modificados para el contexto de este proyecto.

Tabla 5. Parámetros de Pérdidas del Sistema

Parámetro	**Valor / modelo**	**Justificación y referencia**
Soiling (suciedad)	2,5 % anual (constante)	Se aplica este valor superior al típico en instalaciones convencionales por la proximidad de las placas a trabajo agrícola, debido a la remoción de polvo por laboreo, en línea con estudios de ensuciamiento en climas mediterráneos (Ezzaeri et al., 2018).
Pérdida térmica (Uc)	Módulos montados "libres" con circulación de aire	La estructura elevada (4 m) permite ventilación natural bajo los módulos, coherente con el diseño APV descrito por Schindele et al. (2020).
LID (degradación inducida por luz)	1,5 %	Ajustado manualmente sobre el valor por defecto de PVSyst, citando datos de Fraunhofer ISE (2023) para módulos monocristalinos de media célula.
Mismatch de módulos	2,00 % en MPP	Valor predefinido de PVSyst, sin modificación.
Mismatch de strings	0,10 %	Valor predefinido de PVSyst, sin modificación.
Pérdidas óhmicas DC	1,50 % en STC	Valor predefinido de PVSyst; circuito AC sin pérdidas óhmicas al no estar definida aún la distancia: inversor–punto de inyección.
IAM (ángulo de incidencia)	Fresnel, n(vidrio)=1,526, n(AR)=1,290	Modelo estándar de PVSyst para vidrio con capa antirreflectante; no requiere justificación adicional.
Envejecimiento / degradación	No aplicado en la simulación	El módulo de envejecimiento se deja desactivado por el objetivo de la Fase 4b: comparación entre zonas en condiciones equivalentes (año 1), no un estudio de vida útil.
Indisponibilidad	0 %	Se asume disponibilidad operativa del 100 %, para el estudio comparativo representativo.

Elaboración Propia

Los demás apartados de pérdidas del sistema (corrección espectral, consumo auxiliar) se mantienen en sus valores por defecto de PVSyst para silicio cristalino, al no existir en el diseño transformadores de media/alta tensión ni consumos auxiliares relevantes para objetos del estudio.

4.6. Limitaciones del proyecto.

Es imperativo reconocer las limitaciones que pueden presentarse durante el desarrollo del proyecto, al estar sujeto a datos de partida previamente establecidos por distintas entidades estos pueden presentar diferencias de escala a nivel catastral, lo que requeriría de verificaciones y apoyo de toma de cifras *in situ* para el futuro despliegue. Así mismo, es importante distinguir la subjetividad a la que está sujeta el método expuesto en el trabajo, pues puede influir en la asignación dadas a los pesos de los criterios, variando los resultados si llegaran a modificarse las prioridades políticas o ambientales en el territorio.

En cambio, las limitaciones encontradas durante la Fase 5, de validación energética con PVSyst presentan las siguientes limitaciones específicas:

- La validación energética se ha realizado sobre un único punto representativo por clase de idoneidad (Moderada, Alta y Muy Alta), lo que

no permite descartar variabilidad intraclase no observada en las tres simulaciones oficiales.

- Las simulaciones se han ejecutado en condiciones de año 1 y sin degradación acumulada, por lo que los resultados de producción específica y PR no son directamente extrapolables a un análisis de vida útil o de LCOE, para el cual sería necesario aplicar el factor de degradación anual de forma independiente de cada proyecto futuro.
- El diseño de la estructura (altura, separación entre filas, inclinación) se ha mantenido constante entre zonas para aislar el efecto del recurso solar; estudios de optimización específica por zona podría producir resultados de producción distintos a los aquí presentados en la fase de validación.
- No se ha realizado una validación cruzada del recurso solar con una tercera fuente de datos, lo que habría permitido determinar cuál de las dos fuentes empleadas (Global Solar Atlas o PVGIS-TMY) se ajusta mejor a las condiciones reales de Madrid; hay diferencias entre ambas (apartado 6.3.3) que limitan la comparabilidad de valores absolutos de recurso solar entre las fases del estudio.
- Aunque la simulación es clave para verificar lo que se plasma en el mapa, es importante que se tenga en cuenta el comportamiento del cultivo y que este sea simulado previamente al desarrollo de un proyecto para asegurar una buena tendencia en ambas producciones.

5. PLANIFICACIÓN

Este capítulo recoge la planificación temporal del trabajo, los recursos empleados, alcance y mecanismos de control aplicados durante la ejecución. Así mismo, se documentan las desviaciones detectadas respecto a la planificación inicial y las medidas tomadas para la corrección.

5.1. Modelo de proceso adoptado

El estudio adopta un modelo de proceso en donde las primeras cuatro fases (recopilación de información, inventario y normalización de datos, análisis de la situación actual y evaluación de la idoneidad) se desarrollaron de forma secuencial, con una dependencia estricta entre el final de cada una con el inicio de la siguiente. Por ejemplo, no es posible normalizar capas que no se han recopilado, así como no es posible evaluar la idoneidad sin que las capas hayan sido normalizadas.

Por otro lado, la Fase 5, de validación energética, se ejecuta de forma iterativa. La primera ejecución fue desarrollada alrededor del 28 de julio de 2026, esta, pone en manifiesto un defecto en la selección de los puntos de referencia, lo cual generó correcciones en el algoritmo y re-ejecución de la simulación fue desarrollada alrededor del 4 de agosto, luego de que el 30 de agosto se recopilaran de nuevo los puntos referenciados para esta.

Esta elección fue emergente, el modelo iterativo se impuso al verificar que la validación energética requería un ciclo de comprobación de lo planeado inicialmente. Se documenta en esta sección por el valor metodológico que brindó al estudio, siendo extrapolable a proyectos de naturaleza similar.

5.2. Plan de trabajo y calendario

El desarrollo del proyecto se extiende entre enero y septiembre del 2026. La Ilustración 15. Distribución temporal de las Fases metodológicas recopila el diagrama de Grantt correspondiente, con la distribución temporal de las fases metodológicas, dependencias e hitos del proyecto.

Nombre	Duracion	Inicio	Terminado	Predeceso
Entrega inicial, alcance	0 days	28/01/26, 9:00 a. m.	28/01/26, 9:00 a. m.	
Fase 1. Recopilación de información	30 days	2/02/26, 9:00 a. m.	13/03/26, 6:00 p. m.	
Fase 2. Inventario y normalización de datos	23 days	16/03/26, 9:00 a. m.	15/04/26, 6:00 p. m.	2
Cierre de inventario de datos	0 days	15/04/26, 6:00 p. m.	15/04/26, 6:00 p. m.	3
Entrega intermedia	0 days	30/04/26, 9:00 a. m.	30/04/26, 9:00 a. m.	
Fase 3. Análisis de la situación actual	22 days	16/04/26, 9:00 a. m.	15/05/26, 6:00 p. m.	3
Fase 4. Evaluación de idoneidad	11 days	18/05/26, 9:00 a. m.	1/06/26, 6:00 p. m.	6
Mapa de idoneidad clasificado	0 days	1/06/26, 6:00 p. m.	1/06/26, 6:00 p. m.	7
Fase 5. Validación energética con PVSyst	**46 days**	**2/06/26, 9:00 a. m.**	**4/08/26, 6:00 p. m.**	
Cruce con la capa catastral SIGPAC	14 days	2/06/26, 9:00 a. m.	19/06/26, 6:00 p. m.	7
Selección de parcelas representativas	10 days	22/06/26, 9:00 a. m.	3/07/26, 6:00 p. m.	10
Configuración del sistema en PVSyst	15 days	6/07/26, 9:00 a. m.	24/07/26, 6:00 p. m.	11
Ejecución de simulaciones e iteraciones	6 days	28/07/26, 9:00 a. m.	4/08/26, 6:00 p. m.	12FS+1 day
Primera ejecución de simulaciones	0 days	28/07/26, 9:00 a. m.	28/07/26, 9:00 a. m.	
Verificación y control de calidad del modelo	18 days	5/08/26, 9:00 a. m.	28/08/26, 6:00 p. m.	13
Redaccuón de memoria	163 days	2/02/26, 9:00 a. m.	16/09/26, 6:00 p. m.	
Deposito final, convocatoria extraordinaria	0 days	17/09/26, 9:00 a. m.	17/09/26, 9:00 a. m.	

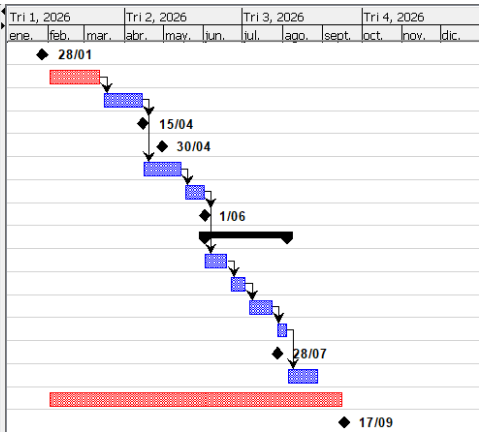


Ilustración 15. Distribución temporal de las Fases metodológicas

Elaboración propia por medio del Software ProjectLibre

El trabajo fue organizado bajo dos condicionantes. La primera, la dependencia que existe estrictamente entre las fases 1 a 4, pues cada una requiere la salida de la anterior, de modo que un retraso en la adquisición, normalización y su armonización retrasa necesariamente el análisis. El segundo, la concentración de la fase de validación energética en el tramo final, decisión que responde a la necesidad de disponer del mapa de idoneidad clasificado antes de poder seleccionar los emplazamientos representativos.

La redacción de la memoria se desarrolla de forma transversal a lo largo del periodo, y no como una fase terminal, con el fin de documentar decisiones de implementación al momento de adoptarlas.

Tabla 6. Hitos del proyecto

Hito	**Fecha**
Seguimiento y entrega inicial: comunicación del alcance y cronograma al director del máster	28 de enero de 2026
Cierre del inventario y normalización de datos (fin de Fase 2)	15 de abril de 2026
Seguimiento y entrega intermedia	30 de abril de 2026
Obtención del mapa de idoneidad clasificado (fin de Fase 4)	1 de junio de 2026
Primera ejecución de las simulaciones en PVSyst	28 de julio de 2026
Re-ejecución tras la corrección del criterio de selección de puntos	30 de julio de 2026
Re-ejecución tras la corrección de los metadatos geográficos	4 de agosto de 2026
Depósito final del TFM e informe de idoneidad del director	17 de septiembre de 2026
Defensa pública ante tribunal	25 de septiembre de 2026

Elaboración propia

La dedicación del proyecto fue organizada en jornadas de alrededor de cuatro horas, con una media de 20 horas semanales en los periodos de trabajo activo. Se consideran periodos no productivos correspondientes a los exámenes de las asignaturas cursadas en el máster, así como las clases, los días festivos, dominicales y compromisos personales y profesionales. La carga nominal de 150 horas asignada a los seis créditos de la asignatura fue superada, esto atribuido al volumen del procesamiento geoespacial y los imprevistos obtenidos en las iteraciones de corrección que se describen en el apartado 5.7.

5.3. Recursos empleados

El trabajo fue desarrollado de forma individual por el autor, asumiendo los roles de responsable del proyecto y ejecutor técnico. No participaron terceras personas en la ejecución de las actividades.

Tabla 7. Recursos empleados

Categoría	**Recurso**	**Función en el proyecto**
Software SIG	QGIS 3.40.10 «Bratislava»	Procesamiento geoespacial y álgebra de mapas
Entorno de automatización	PyGIS (Python 3.12.11), GDAL 3.11.3	Automatización, verificación y extracción de estadísticos
Simulación energética	PVSyst	Validación energética de los emplazamientos
Ofimática	Procesador de textos (WORD) y hoja de cálculo (EXCEL)	Redacción y tratamiento tabular
Fuentes de datos	IDEM, CNIG, SIGPAC, Global Solar Atlas, PVGIS, SRTMGL1	Capas de partida del modelo
Equipo	Estación de trabajo personal	Ejecución de todo el procesamiento

Elaboración propia

La totalidad del software empleado se encuentra bajo licencia libre o de prueba, y la totalidad de las fuentes de datos son de acceso público y gratuito. El proyecto no requirió de presupuesto para su ejecución. Esta condición no es de accesorio, pues, constituye uno de los argumentos de transferibilidad del modelo, dado que su replicación en otro territorio no está condicionada a la adquisición de datos comerciales.

5.4. Alcance del proyecto

Con la finalidad de delimitar los compromisos asumidos, se declara el alcance del trabajo.

Incluido en el alcance:

- Análisis multicriterio de idoneidad territorial para sistemas APV sobre la totalidad de la Comunidad de Madrid, a la resolución del modelo digital de elevaciones empleado.
- Aplicación de siete criterios de evaluación y dos restricciones absolutas.
- Clasificación del territorio en cuatro categorías de idoneidad más la categoría de exclusión.
- Cruce con la capa catastral del SIGPAC para los usos de olivar y viñedo.
- Validación energética mediante simulación de tres emplazamientos representativos, uno por cada una de las tres clases superiores de idoneidad.
- Verificación de la correspondencia entre la formulación declarada del modelo y su implementación efectiva.

Excluido en el alcance:

- Análisis económico detallado de viabilidad, cálculo de LCOE y modelización financiera. El apartado [7.5] incorpora únicamente una estimación de primer orden.
- Análisis a escala de parcela individual, incluyendo micro-orografía, régimen de tenencia y capacidad real de evacuación en el punto de conexión.
- Cultivos distintos del olivar y el viñedo.
- Modelización agronómica del efecto del sombreado sobre el rendimiento del cultivo y cálculo del Land Equivalent Ratio.
- Diseño de detalle de la instalación, cálculo estructural y tramitación administrativa.
- Validación de campo mediante mediciones in situ.

Los elementos excluidos se recogen entre las líneas de trabajo futuro.

5.5. Análisis de viabilidad

Previo a la ejecución se identificaron los factores que podían comprometer la viabilidad del trabajo, así como las alternativas previstas para cada uno de ellos.

Tabla 8. Análisis de viabilidad del proyecto

Área y problemática	Probabilidad	Impacto	Alternativa prevista
Datos. Ausencia o no disponibilidad pública de alguna de las capas requeridas	Media	Alto	Sustitución por fuente equivalente; en el caso de la capa de radiación, contraste entre Global Solar Atlas y PVGIS
Técnica. Resolución insuficiente de las fuentes climáticas frente a la escala del análisis territorial	Alta	Medio	Reconocimiento explícito de la limitación y control de la separación mínima entre puntos de muestreo
Técnica. Heterogeneidad de sistemas de referencia y resoluciones entre capas	Alta	Medio	Fase específica de armonización previa a cualquier operación de álgebra de mapas
Herramientas. Disponibilidad de licencia de PVSyst para la fase de validación	Media	Alto	Ejecución de la validación con la licencia de prueba gratuita, acotando el número de simulaciones al mínimo representativo
Metodológica. Subjetividad en la asignación de pesos del modelo	Alta	Medio	Fundamentación de cada peso en literatura contrastada y análisis posterior del comportamiento efectivo del modelo
Temporal. Duración de la fase de procesamiento superior a la prevista por el volumen de datos	Media	Medio	Automatización mediante PyGIS, que permite re-ejecutar el flujo completo sin repetir el trabajo manual
Normativa. Modificación del marco regulatorio durante la ejecución	Baja	Alto	Seguimiento de las publicaciones oficiales e incorporación en el estado del arte

Elaboración propia

De estos riesgos identificados, las fuentes climáticas se materializan efectivamente durante la Fase 5, como se detalla en el apartado 5.7. La medida preventiva prevista no había sido incorporada en el algoritmo en la primera versión, derivado en la primera desviación registrada.

5.6. Indicadores de control y seguimiento

El seguimiento del proyecto se apoyó en las entregas establecidas por la titulación y en conjunto con los indicadores destinados a verificar el avance frente a lo planeado.

Tabla 9. Indicadores de control del proyecto

Indicador	Previsto	Alcanzado	Lectura
Entregas de seguimiento a la titulación	2	2	Cumplidas en plazo
Capas cartográficas procesadas e integradas	9	9	Inventario completado sin bajas
Criterios implementados y verificados	7	7	Modelo completo
Scripts desarrollados y documentados	4	7	Ampliados con los tres de verificación (Anexos C.5 a C.7)
Simulaciones energéticas ejecutadas	3	6	Duplicadas por las dos iteraciones de corrección

Elaboración propia

Las dos desviaciones que se registran presentan un balance positivo y una causa. El número de scripts pasa de 4 a 7 al incorporarse los procedimientos de verificación del modelo, que no habían sido tenidos en cuenta al inicio; y el número de simulaciones pasa de 3 a 6, debido a las dos iteraciones descritas en el siguiente apartado. Las tres simulaciones sumadas no se descartan, se reencuadran como análisis de sensibilidad en el criterio de selección de las coordenadas representativas, aportando un resultado propio del desarrollo del estudio.

5.7. Gestión de cambios

Se detectan dos desviaciones durante la ejecución, ambas en la fase de validación energética. Estos se documentan para construir el proceso de gestión del proyecto, con independencia en su análisis (apartados 6.8 y 6.9).

Cambio 1. Corrección del criterio de selección de los puntos representativos.

Al comparar los resultados de las tres primeras simulaciones se observa que dos de estas contenían producciones energéticas idénticas, prácticamente, lo que resultaba incompatible con la hipótesis inicial para las clases de idoneidad, que representarían rendimientos diferentes.

El diagnóstico. La selección tomaba la primera parcela encontrada en el recorrido de la capa, sin imponer alguna condición de separación entre puntos. Dos emplazamientos quedan en una misma rejilla climática de PVGIS y recibieron resultados idénticos.

Corrección. Se incorpora en el script la selección de la parcela de mayor superficie de cada clase, y la verificación de la separación mínima mediante la fórmula de Haversine. Esto amplió la Fase 5 a dos jornadas y duplica el número de simulaciones. No tiene impacto en las fases anteriores.

Cambio 2. Corrección de metadatos geográficos en las simulaciones.

Durante la revisión de los informes generados se evidencia que el mediodía solar aparecía representado a las 12 horas en cuatro de los seis diagramas de isosombras, frente a las 13 horas de los dos restantes.

Diagnóstico. Cuatro emplazamientos contaban con una altitud definida en 0m y huso horario TC, en lugar de su altitud real y huso UTC+1 correspondiente a España peninsular.

Corrección. Se redefinen los sitios con sus valores reales, se realiza nuevamente el proceso de reimportación de las series metodológicas y se Re ejecutan las simulaciones. Esta segunda iteración de la Fase 5, amplia la jornada, pero sin tener impactos en el desarrollo del documento.

Ambos cambios son identificados con las comprobaciones incorporadas al proceso y no por una revisión externa, lo que confirma la utilidad de haber incluido una fase de verificación en el estudio. Además, es importante señalar que ninguna desviación hubiera sido detectable a partir de los valores numéricos de salida por si solos, pues la primera

fue identificada por la coincidencia anómala de los resultados, y la segunda por la posición del mediodía solar en la representación gráfica.

Esto sugiere que el control de calidad en la fase de simulación no puede ser limitado a la verificación de resultados finales, sino que debe ser con los parámetros de entrada y salida de gráficas intermedias.

6. DESARROLLO.

6.1. Arquitectura del modelo y su encadenamiento

El modelo multicriterio se ha implementado en el software QGIS 3.40.10, en el cual se automatiza el procesamiento por medio de la consola y editor de scripts de Python: PyGIS. El uso de esta consola responde a dos necesidades del proyecto: la trazabilidad de cada operación que queda registrada en scripts, los cuales son Re ejecutables y se incorporan como anexos; y su rápida reproducción, pues permite que se recalculen adecuadamente n caso de que sean modificados pesos o capas de partida. Esta última condición es muy importante en un modelo que tiene una ponderación revisable (Anexos C.5 a C.7), pues ante cambios en prioridades territoriales o normativos llega a facilitar la incorporación de estas nuevas medidas.

Este proceso fue ordenado en seis operaciones encadenadas, en donde cada una de estas se toman como entrada y salida de la anterior (Ilustración 16):

1. **Armonización:** las capas de partida se trasladan a un solo sistema de referencia, una extensión y una resolución en común.
2. **Normalización:** cada criterio se lleva a una escala adimensional de 0 a 1.
3. **Construcción de máscaras:** se excluyen los territorios en los que hay restricciones absolutas para la implementación de la APV.
4. **Superposición ponderada (WLC):** se superponen las capas con los criterios normalizados, en donde no hay territorio excluido.
5. **Clasificación:** el índice continuo resultante se organiza en las categorías de idoneidad.
6. **Acoplamiento catastral:** se crea una visión específica para las parcelas SIGPAC de Olivar y Viñedo.

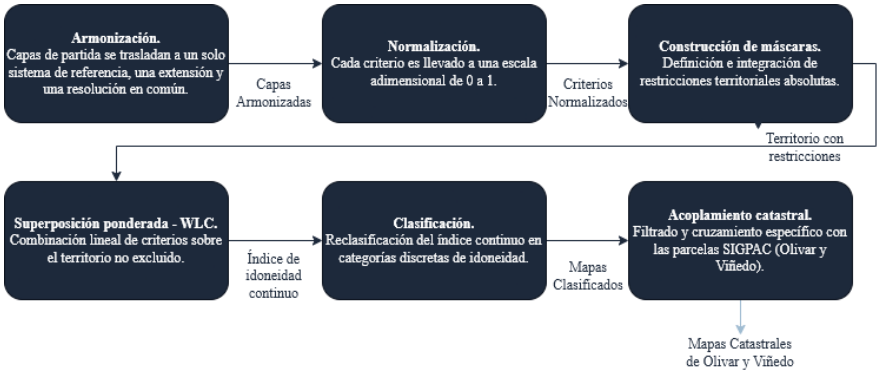


Ilustración 16. Encadenamiento operativo del modelo: operaciones ejecutadas y productos intermedios generados en cada fase.
Elaboración propia.

6.2. Armonización y preparación de las capas base

Inicialmente se presentaron distintos formatos, sistemas de referencia y resoluciones en las capas de partida, esto impedía realizar cada operación para solapar los mapas. Las capas de restricción e infraestructura se encontraban en formato vectorial (subestaciones, líneas de evacuación y vías de acceso como lineales; y, Red Natura 2000, Suelo Urbanizado y clases agrológicas en polígonos), mientras que los modelos de elevación digital (DEM), la radiación solar global horizontal (GHI) ya contenían un formato ráster, es decir, una malla de celdas o píxeles ordenados previamente en filas y columnas.

Para homogeneizar este conjunto de capas y datos se ejecutan tres operaciones sucesivas:

1. **Re-proyección.** Cada capa es llevada al sistema de referencia ESPG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N). Esto es relevante para el cálculo de las superficies en hectáreas que se mencionarán a lo largo del documento y trabajar cualquier tipo de medición en metros. Es importante señalar que la capa de GHI es distribuido originalmente en ESPG:4326, por lo que su reproeycción fue realizada de manera previa como cualquier otra.
2. **Conversión de capas vectoriales de infraestructura a superficies continuas de distancia.** Las capas con naturaleza lineal o puntual no tienen la posibilidad de integrarse directamente a la suma de rásteres pensada para este documento. Por lo cual, para cada una de estas se genera una superficie de distancia euclidiana, en la cual el valor de cada píxel es llevado a una expresión de distancia en metros a los elementos más próximos, allí se obtienen capas de distancia a subestaciones, a redes de alta tensión y vías de acceso. Estos cambios son los que permiten el tratamiento de los datos de accesibilidad y conectividad eléctrica como variables continuas, y no como variables que solo nos dan información de ausencia o presencia (binaria).
3. **Unificación de la resolución y extensión.** La resolución fue llevada y fijada en 26,39 m, valor resultante de la reproyección del DEM SRTM a EPSG:25830 en la latitud de la Comunidad de Madrid. Las capas de menor resolución se Re muestrearon a esta rejilla común. Entre estas está el Re-muestreo de vecino más próximo, para variables de categorías como clases agrológicas, con el fin de no generar algún valor intermedio que no aporte significado al modelo.

En este último punto cabe señalar que la capa de radiación solar GHI, que constituye el criterio de mayor peso en el modelo (25%), presenta la resolución de 250m, frente a la rejilla de trabajo de 26,39m. Para el Re-muestreo a esta última no incorpora información nueva del recurso solar, no varía, pues produce el valor que contiene la celda original en un conjunto más específico y fino de pixeles. Con esto, se genera una precisión aparente, superior a la real que se generaba en este componente. Esto no invalida el modelo, pero delimita el alcance de su lectura. Es por esto por lo que las diferentes idoneidades obtenidas no deben ser tomadas como diferencias en el recurso solar, sino como diferencias en el conjunto de criterios, específicamente en los de resolución nativa, estos son, orografía, distancias e infraestructura.

Finalmente, para el análisis se realizó el recorte al límite administrativo de la Comunidad de Madrid. Aquellos pixeles que se encontraban fuera de este límite y aquellos sin valor asignado a alguna de las capas de entrada, codificándolos como "NoData", quedando excluidos para cualquier iteración posterior, dando así una superficie trabajada total de 790.315,7 ha. Se pueden reconocer diferencias entre la superficie de Madrid de 802 mil hectáreas, aproximadamente, y las mencionadas, esto es un efecto del método, más no una pérdida de información sustantiva.

6.3. Normalización de los criterios.

Cada criterio de los siete definidos en el apartado 4.2 se ha transformado a una escala adimensional común de 0 a 1, esto, previo a la aplicación de los pesos correspondientes. Esto va a garantizar la comparabilidad entre capas y variables de naturaleza distinta (radiación en kWh/m^2, distancias en metros, clases agrológicas y variables binarias de exclusión), y, de la misma forma, impedir que una variable o capa domine por completo el resultado, por lo que ya no se expresará en una magnitud mayor.

La normalización no ocurre de manera solitaria, la función depende de la naturaleza de la variable y el sentido que se encuentra en ella, es decir, si favorece o penaliza la implementación del sistema APV, en este caso. Para esto se identifican cuatro casos, y se resumen en la tabla 6:

El primero es en las variables continuas de sentido directo, es decir, la GHI, contiene un mínimo de 1.455 kWh/m²/año y un máximo de 1.698 kWh/m²/año, en donde se aplica una normalización relativa, asignando valores de 0, para el mínimo, 1, para el máximo, y un valor de 0,5, el cual indica un punto medio del recorrido madridleño, el cual se sitúa en su mayoría en el rango alto, del contexto europeo.

En segundo lugar, se tienen las variables continuas con sentido inverso, es decir, las tres capas de distancia (subestaciones, redes de alta tensión, y vías de acceso) y la pendiente, estas son normalizadas por una función lineal inversa: entre menor sea la distancia o menor pendiente mayor es la puntuación. En el caso de la pendiente, umbral del 15% definido en la metodología y opera como el límite de la función, se asigna el valor 0 a toda la superficie que lo supere, por el hecho de ser incompatible, tanto por el paso de maquinaria bajo la estructura como la gestión de la escorrentía en los módulos.

Y, finalmente, las variables categóricas, acá se encuentra la capacidad agrícola, la cual fue reclasificada al rango 0 a 1. La capacidad agrológica constituye la principal singularidad del estudio, la máxima puntuación no corresponde a la mejor capacidad productiva del suelo, sino a las clases 3 y 4, de limitaciones moderadas y severas. Esto, fundamentado en que el beneficio sinérgico de la agrivoltaica es mejor en donde el sombreado parcial que ejercen los módulos compensa el estrés hídrico y térmico de los cultivos (Dupraz et al., 2011; Schindele et al., 2020), mientras que en los de excelente capacidad no se requiere esta compensación, lo que resultaría en una intervención difícilmente justificable para la protección de los suelos productivos. Por esto, la decisión del modelo se traduce en una hipótesis agronómica de reclasificación.

Tabla 10. Normalización aplicada por criterio

Criterio	Naturaleza	Función aplicada	Valor 0	Valor 1
Radiación solar (GHI)	continua	lineal *min-max* directa	1.454,79 kWh/m²/año	1.697,68 kWh/m²/año
Pendiente	continua	lineal inversa truncada, máx(0; 1 − p/8,5)	≥ 8,5° (14,95 %)	0°
Orientación	circular	coseno centrado en el sur, [cos(α−180°)+1]/2	norte (0°/360°)	sur (180°)
Capacidad agrológica	ordinal	reclasificación binaria no monótona	Clases 1, 2, 5, 6, 7, 8 y sin clasificar	clases 3 y 4
Infraestructura eléctrica	continua	1 − ½ · (d_AT/62.472 + d_sub/63.896)	≥ 63 km	0 m
Vías de acceso	continua	1 − d_vías / 59.140	≥ 59.140 m	0 m
Red Natura 2000	binaria	máscara de exclusión	Exterior del espacio protegido	interior

Elaboración propia

6.4. Restricciones absolutas frente a criterios compensatorios

La superposición ponderada es un método compensatorio, es decir, una puntuación baja en el criterio se puede contrarrestar por puntuaciones altas en los restantes. Esto es favorable para criterios de aptitud—una parcela algo más alejada de una subestación puede seguir siendo idónea si su recurso solar y su capacidad agrológica son favorables—pero resulta inaceptable para las restricciones legales. Si un espacio se encuentra en territorio Red Natura 2000 no se admite compensación, esto quiere decir que bajo ninguna combinación de radiación, pendiente y accesibilidad puede caer en la habilitación de este, esto por mandato de la Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética y de la Directiva RED III.

Es por esto por lo que el modelo combina dos lógicas en la misma expresión. Las capas de Red Natura 2000 y suelo urbanizado se aplican como "máscaras binarias absolutas", previo al cálculo, en donde el valor nulo se asigna a los pixeles que recaen en la zona. Sobre el territorio restante se aplicaría la combinación lineal ponderada de los siete criterios normalizados ya mencionados. Formalmente podemos expresar el modelo como el producto de una máscara por una suma ponderada:

Fórmula 4. Modelo de suma ponderada

$$Índice\ APV = M * \sum (w_i * X_i)$$

Donde "M" toma el valor de 0 en la exclusión y 1 en el resto. En la Formula 5 se recopila el modelo instaurado, y los pesos justificados en el apartado 4.2. todas las variables "Xi" están normalizadas en el intervalo [0, 1], conforme a lo detallado en la tabla 8, X_GHI corresponde a la radiación solar global horizontal, X_Pen a la pendiente, X_Ori a la orientación, X_Agr a la capacidad agrológica, X_RN a la Red Natura 2000, X_Inf a la proximidad conjunta a subestaciones y red de alta tensión, y X_Vía a la proximidad a las vías.

Fórmula 5. Índice APV

$$Indice\ APV = M(\ 0{,}25 \cdot X_GHI\ +\ 0{,}10 \cdot X_Pen\ +\ 0{,}05 \cdot X_Ori\ +\ 0{,}20 \cdot X_Agr\ +\ 0{,}15 \cdot X_RN\ +\ 0{,}15 \cdot X_Inf\ +\ 0{,}10 \cdot X_Vía\ )$$

Ahora bien, es importante mencionar que la capa de Red Natura 2000 entró en la combinación ponderada codificada en sentido inverso: valor 1 las zonas protegidas y 0 en las accesibles para la implementación de la APV. La capa opera como una restricción absoluta, es decir, el peso del 15% no ejerce función discriminante en el territorio apto.

Esto tiene una implicación sobre la escala, por lo que es importante aclarar que el valor máximo alcanzable no es 1, sino 0,85, lo que corresponde a la suma de los pesos de los demás criterios debidamente compensados. La ponderación real en estos criterios equivaldría a los valores presentados en la Tabla 11, y son re escalados sobre 0,85.

Tabla 11. Pesos nominales y efectivos sobre el territorio evaluado

Criterio	Peso nominal	Peso efectivo
Radiación solar	25%	29,40%
Capacidad agrológica	20%	23,50%
Infraestructura eléctrica	15%	17,60%
Pendiente	10%	11,80%
Vías de acceso	10%	11,80%
Orientación	5%	5,90%
Red Natura 2000	15%	— (restricción)

Elaboración propia

Es relevante mencionar que esta re-escalación no alterará el resultado cartográfico, pues, al hablar de una transformación aplicada de manera homogénea a cada píxel, el orden relativo de idoneidad no varía, además de la clasificación territorial y la superficie resultante.

6.5. Implementación de la superposición ponderada

Con los criterios normalizados y las máscaras creadas se crea la combinación lineal ponderada, por medio de la calculadora ráster de QGIS, en donde se aplicó la expresión de la fórmula 2 sobre las capas.

El índice presenta un rango efectivo de 0,230 a 0,843 sobre el territorio que no se excluye. Confirmando el máximo alcanzable de 0,85 del territorio con potencial a aplicar la APV, el mayor valor observado es óptimo en un 99,15%, indicando la reunión de las condiciones óptimas que la Comunidad de Madrid representa para la implantación de la tecnología. El recurso solar, la capacidad agrológica, pendiente apta, proximidad a redes de evacuación y accesibilidad viaria constituyen el entorno óptimo para esta, representando la viabilidad territorial de la APV en la región.

Este rango también verifica la exclusión que se tuvo en cuenta para realizar la cartografía, pues no presenta valores intermedios entre el mínimo de 0,230 y el cero, lo que se evidencia como una discontinuidad neta como se observa en el Anexo 9 (Para la verificación se utiliza el Anexo C. 5).

6.6. Clasificación del índice en categorías de idoneidad

El índice es una variable continua, lo que nos permite realizar un análisis de manera más sencilla para la planificación territorial, ya que su interpretabilidad es favorecida. La transformación es dada en el territorio apto y fuera de las exclusiones, dando lugar a cuatro clases de idoneidad—codificadas con los valores 1 a 4 en el ráster clasificado— y la categoría de exclusión total.

Para la comprobación de la reclasificación se realizan cortes de 0,40, 0,60 y 0,75 sobre el índice continuo, y con esto se contaron los píxeles que quedaban para cada clase. Los conteos coinciden con los del mapa clasificado, con una diferencia del 0,44%. Esta diferencia mínima se puede diferir al tamaño del píxel. En el índice del mapa clasificado se tienen píxeles diferenciados por once milímetros: 26,3962 m frente a 26,3852 m. Esto como parte de las re-proyecciones sucesivas que se han llevado en el modelo de elevaciones. Pues, si se superponen las capas esa diferencia se va incrementando capa a capa, píxel a píxel. Esto solo afecta los resultados que están en la frontera de dos clases, pues pueden caer uno al lado del otro.

Estos umbrales mencionados se establecen por medio de métodos automáticos de clasificación por dos razones. La primera es la interpretabilidad, esta escala normalizada expresada en números redondos ayuda de manera visual a analizar los datos, por lo cual, la información es manejada de manera más sencilla para la toma de decisiones sobre el territorio. La segunda es que permite aplicar el método a otros territorios y contrastar resultados, por medio de cortes naturales que nos darían a observar límites específicos en un conjunto de datos. Como consecuencia, la partición genera clases de superficies desiguales, concentrando la idoneidad en la categoría Media, con un 40%, como se observa en la tabla 12 (para la verificación se hizo por medio del Anexo C. 6).

Tabla 12. Intervalos del índice y superficie por categoría de idoneidad

Clase	Intervalo del índice	Superficie (ha)	% del territorio evaluable
Excluido	0 (máscara)	402.720,69	—
Baja idoneidad	0,230 – 0,400	27.300,96	7,10%
Media idoneidad	0,400 – 0,600	155.417,80	40,20%
Alta idoneidad	0,600 – 0,750	115.192,00	29,80%
Muy alta idoneidad	0,750 – 0,843	88.893,68	23,00%

Elaboración propia

Conviene señalar, y recordar, que las clases agrícolas que se tomaron como óptimas son las 3 y 4, y por consecuencia estas fueron evaluadas como binarias —el suelo apto puntúa 1 y el resto 0— y pesa un 20 % en el modelo. Lo que por resultado nos queda un territorio dividido en dos, uno con condiciones aptas para la APV y otro que no. Y, en cada grupo las diferencias si responden a las fluctuaciones de la radiación y la pendiente, sin embargo, el salto más relevante lo dan los suelos.

6.7. Acoplamiento con la capa catastral del SIGPAC

El índice de idoneidad, al ser continuo y de base ráster, describe el territorio de manera abstracta, pero no identifica las unidades de gestión en las cuales se pueda implantar el proyecto. Para resolver esto se incorpora la capa catastral del SIGPAC (Comunidad de Madrid, 2026), y esta es filtrada en OV y VI. Este cruce se realiza por medio del script del Anexo C. 1, en PyGIS, el cual re-proyecta las capas a ESPG:25830, calculando el centroide de cada parcela y asignándole un valor de idoneidad, esto identificado por el campo "IDO_CLASE" en la capa resultante.

La asignación por centroide es una simplificación muy útil en parcelas de superficies grandes y orografía heterogénea, esta se caracterizará por el valor del píxel de los 26 m, aproximadamente, que se ha venido mencionando. Se escoge este criterio por encima de la estadística zonal por dos razones, y para no caer en la asignación del valor medio en cada parcela. Lo primero es la coherencia con el solape de las capas, el objetivo no es caracterizar cada parcela, es tamizar el catastro agrícola para organizarlo como prioridad de estudio. Y, en segundo lugar, la continuidad en la metodología, este mencionado centroide corresponde más que a un punto en donde se extraen las coordenadas para la validación energética, esto da lugar a que el punto simulado y el punto idóneo marquen con exactitud esta localización.

6.8. Selección de los puntos representativos para la validación

A partir de la capa de parcelas de viñedo ya clasificadas se seleccionan unas coordenadas representativas de cada clase de idoneidad, automatizándolo mediante un script en QGIS/PyGIS (Anexo C. 2), este identifica las parcelas de VI dentro de cada idoneidad definida. Posterior a la ejecución de este reveló que no seleccionaba los puntos sin algún distanciamiento importante entre estos, lo que dificultaba posteriormente el análisis de los datos obtenidos ya que en la idoneidad Alta y Muy Alta eran relativamente similares. Se encontró que el distanciamiento era de aproximadamente 250m, sin variaciones relevantes en cuanto a la irradiación. Para la corrección de esto, se modificó el script, incorporando un informe de distancias (fórmula Haversine) entre los puntos resultantes, para verificar que no quedaran en la misma rejilla climática exigiendo un espaciado superior a 5km, y se seleccionaron las áreas máximas de cada zona de idoneidad. Obteniendo ahora distancias entre 10 y 55 km aproximadamente (ver tabla 13).

Tabla 13. Coordenadas de Simulación

Zona de idoneidad	Coordenadas (corregidas)	Parcela de referencia
Muy Alta	40,078759 N, -3,58132 W	10,55 ha (viñedo)
Alta	40,323965 N, -4,098818 W	19,33 ha (viñedo)
Media	40,170774 N, -3,478447 W	9,28 ha (viñedo)

Elaboración propia

Las coordenadas obtenidas inicialmente se conservarán para el análisis de la importancia de la sensibilidad con la que deben ser seleccionados los puntos a estudiar. Este representa un resultado complementario al apartado de Resultados, mientras que las simulaciones realizadas para los puntos plasmados en la tabla 13 constituyen el resultado oficial de esta fase.

6.9. Verificación y control de calidad

A lo largo de la ejecución se aplican distintas comprobaciones para la detección de posibles errores en el procesamiento antes del análisis de los resultados. Serán recogidas a continuación, ya que su identificación y corrección permitieron dejar de lado el sesgo en las conclusiones del documento.

1. **Verificación en la formulación:** Se seleccionaron dos pixeles para ser contrastados y manualmente se reconstruye el índice de las capas normalizadas en las coordenadas y sus pesos respectivos. Estos valores demostraron diferencias mínimas, de aproximadamente $9x10^{-9}$, su valor reducido nos dice que la fórmula 2 fue implementada correctamente (Anexo C. 5).
2. **Verificación de valores de salida:** Se comprueba que ningún píxel se encuentra por fuera de los valores [0, 1].
3. **Verificación de la clasificación:** la clasificación se comprueba, el índice continuo que se da entre umbrales declarados nos lo confirma, y el script del Anexo C. 6 confirma la diferencia de cerca de 0,44%.
4. **Coexistencia de rejillas:** las áreas se re-computaron con el reconteo de píxeles. Es importante aclarar que el proyecto opera con dos rejillas diferentes: las de criterio y ráster operan con un píxel de 26,3962 m de lado, mientras que el ráster reclasificado presenta uno de 26,3852 × 26,3607 m, diferencia originada de las sucesivas re-proyecciones del DEM a EPSG: 25830.
5. **Alineación entre capas:** se comprueba que las capas normalizadas comparten rejilla con el ráster de salida. La capacidad agrológica y las capas de distancia tienen extensiones propias, y su integración requiere alineación previa. Se verifica, además, que el valor en el índice de coordenadas muestreadas corresponde al de la capa original, lo cual confirma el ajuste.
6. **Valores sin dato:** las superficies que no tienen clasificación agrológica se recodificaron a 0, esto es coherente con el tratamiento de suelo no apto.

6.10. Comportamiento del modelo y análisis de sensibilidad

La ponderación que se muestra en la Tabla 3 fue asignada luego de la revisión bibliográfica, y luego de los ajustes explicados en el apartado 4.2. Ahora bien, es importante aclarar que el peso que es designado para cada criterio determinará la importancia de este, pero no la capacidad discriminatoria, pues, esta dependerá también de la variabilidad que este criterio presente sobre el terreno evaluado. Un criterio de máxima relevancia, conceptualmente hablando, no puede diferenciar un emplazamiento de otro si no se satisface de manera similar.

Para visualizar de mejor manera este comportamiento descrito se extrajeron los datos de cada capa normalizada (con el script contenido en el Anexo C. 7), enfocados en las parcelas no excluidas, y se estimó la contribución de cada criterio frente a la variación del índice como el producto de su peso por la desviación típica. Como se verá a continuación en la Tabla 14, los resultados contienen diferencias importantes entre la ponderación declarada en la sección 4.2 y el comportamiento real dentro del modelo.

Tabla 14. Comportamiento efectivo de los criterios evaluados

Criterio	Peso	Media	Desv. típica	Contribución	Varianza explicada
Capacidad agrológica	0,2	0,5322	0,499	50,40%	76,00%
Radiación solar	0,25	0,7847	0,1691	21,30%	13,60%
Pendiente	0,1	0,4504	0,3161	16,00%	7,60%
Orientación	0,05	0,5422	0,3507	8,90%	2,40%
Infraestructura eléctrica	0,15	0,9346	0,0445	3,40%	0,30%
Vías de acceso	0,1	0,9984	0,0022	0,10%	0,00%
Red Natura 2000	0,15	0	0	0,00%	0,00%

Elaboración propia

La capacidad agrológica, con peso nominal de 20%, y multiplicar este en el criterio estrictamente binario (con valores de 0 y 1), el aporte final no variará gradualmente, sino que será directamente de 0,00 y 0,20 puntos como se explica en el punto 5.6. Como el territorio que se está evaluando es relativamente simétrica (53,2% apto y 46,8% no apto) la variable alcanza una dispersión similar (0,499). Ahora bien, al no existir valores intermedios en este ítem se genera una variación rotunda (la de 0,00 a 0,20) la cual explica su varianza total de 76%.

Por otro lado, se puede observar la radiación solar, que pese a aportar el mayor peso nominal (25%) aporta solo el 13,6% de varianza. Esto se debe a la homogeneidad de la irradiación en la Comunidad de Madrid. Es importante resaltar que el peso efectivo de este criterio, una vez se descuenta la fracción no discriminante, asciende a 29,4%, valor próximo a los 30% del modelo de referencia, esto, debido a que el peso asignado a la Red Natura 2000 no llega aplicarse a ningún píxel, pues en estos se encuentra totalmente restringido, por lo que la operación del modelo se ejecuta sobre un 0,85 y no sobre la unidad. Por lo tanto, el criterio se compensaría e influiría de esta manera. Cabe resaltar que la inutilización de este criterio refuerza y se plasma en el apartado 10, para su futura revisión sistémica.

En el otro extremo podemos encontrar los criterios de infraestructura eléctrica y accesibilidad viaria, las cuales suman un 25% del peso nominal, y aportan alrededor de 0,4% de varianza. Esto se debe a que estos fueron normalizados dividiendo la distancia máxima observada por el valor máximo del ráster de distancias correspondientemente, los valores se encuentran entre 59 y 64 km, a continuación, se puede visualizar mejor, en donde el resultado es una comprensión de la escala útil:

Tabla 15. Escala de los criterios de distancia

Criterio	Denominador de normalización	Máximo en territorio evaluable	Mediana	Escala utilizada
Vías de acceso	59.140 m	2.826 m	52 m	4,80%
Red de alta tensión	62.473 m	18.476 m	1.276 m	29,60%
Subestaciones	63.896 m	22.723 m	5.494 m	35,60%

Elaboración propia por medio de los datos obtenidos con el script del Anexo C. 7

La mediana de una distancia a una vía de acceso es de alrededor de 52m, normalizada con un dominador de alrededor de 59 km, esto quiere decir que la mitad del territorio quedaría comprimido en el 0,088% superior a la escala, es decir, los terrenos evaluados quedan a una distancia muy corta de las vías de acceso, perdiendo el criterio, como consecuencia, su capacidad de discriminar. Esto se puede ver más claro si se observa el Anexo 12, en donde se aprecia la densidad viaria a la que se hace alusión. Ahora bien, ambos criterios aportan cerca de 0,24 puntos, constantes, no hay variabilidad.

Ahora bien, si el criterio de accesibilidad viaria se normaliza por el percentil 99 del territorio evaluable (581 m) en lugar del máximo absoluto del ráster, la desviación saltaría de 0,002 a 0,22 aproximadamente, esto haría un incremento en el orden de magnitud, lo que potenciaría su capacidad de discriminación sin tener que modificar el peso. Por otro lado, si en este mismo sentido se aplicara a la infraestructura eléctrica también se experimentaría esta mejora en el criterio. Por esto, la mejora en los denominadores de normalización encamina una línea de mejora para el modelo, la cual se plasmará en el apartado 10 de líneas futuras.

El análisis en conjunto de los criterios permite evaluar con mayor precisión los índices APV, pues se logra identificar como la clase agrológica inicia la modulación territorial, secundariamente continua el recurso solar y la orografía, sobre el territorio que previamente ha sido homogeneizado con las capas de restricción ambiental y urbana. Esto resulta coherente con lo planteado, pues la APV es una tecnología que es manejada por el criterio agrícola, y no por el energético, lo que se traduce en el texto a la escogencia de las clases agrológicas intermedias y como su adaptación deriva de las necesidades frente al CC de la seguridad alimentaria.

Además, como se observará durante la simulación, en el apartado 6.4, se explica como la producción simulada no reproduce el orden de clases de idoneidad, este será exclusivamente al recurso solar puntual, que es precisamente el de menor variabilidad relativa del modelo. Las diferencias no son sinónimo de error, al contrario, es la manifestación de la idoneidad de una hibridación, no del potencial eléctrico.

Por último, es importante resaltar que las anomalías encontradas entre la ponderación inicial y el comportamiento real del modelo se constituye en una limitación del enfoque en la asignación de pesos, previo al modelo, comportamiento común en la bibliografía citada en el capítulo 2, raramente es aclarada en estos. Para su solución se requiere de un análisis de sensibilidad del sistema sobre escenarios alternativos de ponderación, como se planteará en el apartado 10.

Para finalizar este capítulo es importante aclarar que la ejecución del modelo produjo tres salidas cartográficas encadenadas: el ráster continuo del índice de idoneidad APV, su versión clasificada en cuatro categorías más la exclusión, y el mapa de priorización agrícola resultante del cruce con las parcelas de olivar y viñedo del SIGPAC. Sobre estas tres capas, junto con los resultados de las simulaciones energéticas ejecutadas en los puntos representativos seleccionados, se construye el análisis que se presenta a continuación.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Distribución territorial de la idoneidad APV

El análisis realizado en la Fase 3 permitió conocer el estado actual del territorio destinado para el despliegue de la PV convencional. Se analiza la superficie total del territorio madridleño, 790.315,7 ha, sobre el cual se evaluaron las restricciones territoriales para el emplazamiento de energía solar.

Bajo este contexto, el análisis mediante el script del Anexo C. 4 determinó que la superficie disponible tras la depuración topológica del límite del 4% es de 15.700 ha (157 km^2), lo que representa únicamente el 1,98% del territorio de la región. Este resultado evidencia que la disponibilidad real de la PV está limitada a la estimación inicial de 320 km^2 planteada por la administración local (Comunidad de Madrid, 2025), debido a la eliminación de duplicaciones de recintos, solapes vectoriales de partida. Por su parte, el análisis multicriterio aplicado sobre el territorio de la Comunidad de Madrid produjo un mapa de idoneidad territorial con cinco categorías, su distribución se presenta en la Tabla 7 y cartográficamente se puede evidenciar en el Anexo 9.

Tabla 16. Distribución Territorial de la Idoneidad APV en la Comunidad de Madrid

Categoría	Área (ha)	Área (km^2)	% del territorio
Excluido	403.178,80	4.031,80	51,00%
Baja Idoneidad	27.318,20	273,2	3,50%
Media Idoneidad	155.569,20	1.555,70	19,70%
Alta Idoneidad	115.265,20	1.152,70	14,60%
Muy Alta Idoneidad	88.984,30	889,8	11,30%
TOTAL	**790.315,70**	**7.903,20**	**100%**

Elaboración propia a partir de análisis WLC en QGIS.

De acá se destaca que más de la mitad del territorio queda en la categoría Excluido, cerca del 51% del territorio, esto es debido a la aplicación de las máscaras de Red Natura 2000 y del suelo urbanizado, puesto que estos presentan una exclusión absoluta para el despliegue de APV. Inicialmente esto nos da una idea de la presión a la que se encuentra sometida la Comunidad de Madrid, pues esto impide el despliegue de instalaciones masivas de PV, y se puede limitar a autoconsumos en los tejados, y reafirma la necesidad de encontrar nuevas soluciones, como en este caso la pertinencia de la APV como solución integradora.

En las categorías de no exclusión — aproximadamente 387.136,9 ha —, el 26% presenta idoneidad Alta o Muy Alta, sumando un total de 204.249,5 de hectáreas con condiciones óptimas para el despliegue de sistemas APV. Esta superficie es superior al límite del 4% establecido por la Comunidad de Madrid para PV convencionales — equivalente a aproximadamente 32.000 ha —, lo que demuestra la posibilidad del crecimiento en renovables que podría tener la Comunidad de Madrid, y el territorio que puede aprovecharse para promover la resiliencia de cultivos dentro de las necesidades de la población.

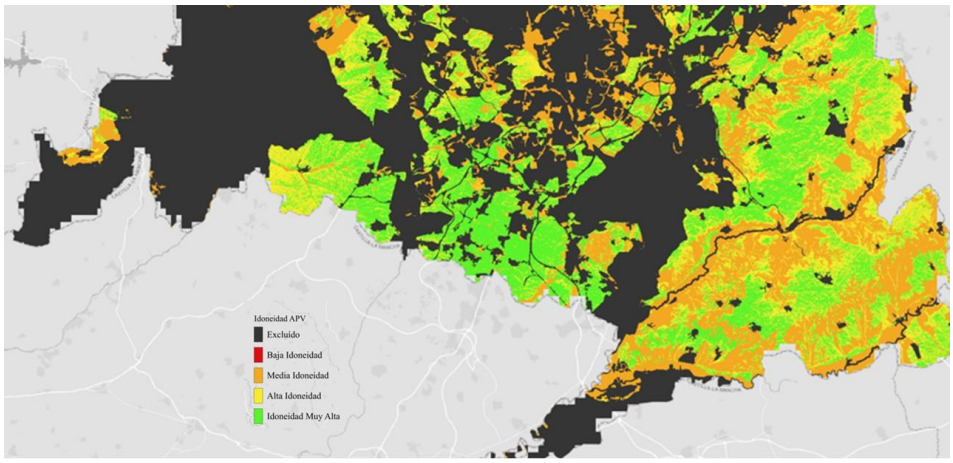


Ilustración 17. Idoneidad en el cuadrante sur de la Comunidad de Madrid

Elaboración Propia

Si se observa el Anexo 9 se puede evidenciar que las zonas que concentran mayor idoneidad se encuentran predominantemente en el sur, sureste y suroeste de la Comunidad de Madrid (ver ilustración 17), lo cual coincide con áreas de pendiente moderada (Anexo 1), suelos de mayor aptitud agrícola (Anexo 2) y la proximidad que hay a los principales corredores de evacuación eléctrica (Anexo 5). Y, por el contrario, en el cuadrante norte y noreste se presentan zonas con predominancia de zonas excluidas o de baja idoneidad (ver ilustración 18), si nos remitimos nuevamente al mapa del anexo 1 evidenciamos las altas inclinaciones que se presentan allí por su proximidad con la Sierra de Guadarrama, representando una restricción orográfica y a su vez la importancia ambiental que contiene la zona (Anexo 6).

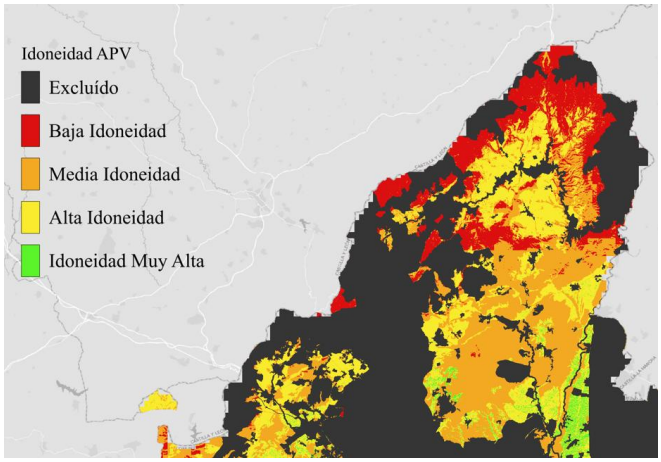


Ilustración 18. Idoneidad en el cuadrante norte de la Comunidad de Madrid

Elaboración propia

Esta distribución refleja el equilibrio entre lo evidenciado en la irradiación horizontal global descritos por el Global Solar Atlas (Solargis, 2023) (Anexo 3) y la viabilidad física del terreno, así como la accesibilidad a la red de transporte y distribución energética gestionada por Red Eléctrica de España.

7.2. Priorización APV para cultivos de olivar y viñedo

La integración de los datos catastrales del SIGPAC (Comunidad de Madrid, 2026) permitió identificar las parcelas de OV y VI dentro de cada categoría de idoneidad (ver Anexo 10), constituyendo el mapa de priorización APV agrícola — producto diferenciador de este estudio respecto a los referentes metodológicos consultados, esto fue posible gracias al código de selección de parcelas representativas (Anexo C. 2), permitiendo este acoplamiento entre los dos mapas (Anexo 9 y 10). Los resultados se presentan en la Tabla 17 y se puede visualizar cartográficamente en el Anexo 11.

Tabla 17. APV y cultivos de Olivar y Viñedo

Categoría	Viñedo (ha)	Olivar (ha)	Total (ha)
Excluido	2.845,80	2.775,50	5.621,30
Baja Idoneidad	0	0	0
Media Idoneidad	735,5	7.748,90	8.484,40
Alta Idoneidad	1.296,40	7.975,50	9.271,80
Muy Alta Idoneidad	1.987,80	8.613,10	10.600,90
TOTAL	**6.865,40**	**27.113,00**	**33.978,40**

Elaboración propia a partir de datos SIGPAC (FEGA, 2024) y análisis WLC en QGIS.

Este análisis nos muestra que 28.357,10 ha de superficie agrícola que se encuentra dedicada a cultivos de OV y VI —correspondientes al 83,5% del total analizado (33.978,40 ha)— se encuentran dentro de áreas con idoneidad Media, Alta o Muy Alta para el desarrollo APV. En donde 19.872,70 ha, más de la mitad del total (58,5%), se sitúa en las clases de idoneidad Alta y Muy Alta. Este hallazgo demuestra que, ante la aplicación del marco normativo, las restricciones ambientales y orográficas no se excluye a estos cultivos permanentes de alto valor agronómico y socioeconómico, al contrario, los posiciona en las zonas de mayor compatibilidad territorial para la hibridación APV, y eventual adaptación al CC.

Principalmente se destacan las 10.600 ha de estos cultivos en una idoneidad Muy Alta, en donde el OV representa un dominio del territorio con 8.613,1 ha frente a 1.987,8 ha. Esto refleja la importancia y da indicios para los puntos de partida en la escogencia de cultivos para Madrid cuando sea el momento del despliegue. Si nos remitimos al Anexo 11 podemos evidenciar la concentración al sur y el sureste de la Comunidad. Por otro lado, se resalta que las parcelas de estos cultivos no representan ningún valor en la idoneidad Baja, indicando la localización de estos en parcelas con pendientes moderadas, y si sumamos las características descritas anteriormente en el punto 6.1, coinciden con los requerimientos óptimos para la APV.

Así mismo, se hallaron 5.621,3 ha de OV y VI clasificadas como excluidas por su proximidad con espacios de la Red Natura 2000, donde la normativa vigente impide el despliegue de instalaciones energéticas. Estas quedan fuera del ámbito de aplicación del presente estudio, aunque podrían ser objeto de análisis en un marco de proyectos de conservación activa que combinen agricultura tradicional y gestión del paisaje, y que posiblemente requieran de algún tipo de suministro de energía dependiendo del entorno en el que se encuentre.

7.3. Validación energética mediante simulación PVSyst

7.3.1. Resultados de las simulaciones

Con la configuración descrita en el apartado de Metodología (Fase 5), inicialmente, como se detalla en la Metodología, la selección de coordenadas representativas contenía una limitación, originalmente se elegía la primera parcela encontrada de VI, sin tener en cuenta distanciamiento y ponderación de la superficie, lo que resulta en que los puntos asignados en las clases Alta y Muy Alta cayeran bajo la misma rejilla climática de PVGIS en PVSyst. Antes de descartar estas simulaciones se decide conservarlas, como análisis de la importancia de la sensibilidad al seleccionar los puntos, los resultados se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Resultados de la Simulación Inicial en PVSyst

Idoneidad	Coordenadas	Producción (kWh/año)	Producción específica (kWh/kWp/año)	PR (%)
Muy Alta	40,238364 N, -4.00086 W	175.739	1.775	85,46
Alta	40.238689 N, -4.005111 W	175.737	1.775	85,46
Media	40.530776 N, -3.30206 W	170.484	1.722	85,47

Elaboración Propia

Esto confirma lo diagnosticado, las zonas Muy Alta y Alta de coordenadas originales producen resultados muy similares, 175.739 y 175.737 kWh/año respectivamente, una diferencia inferior al 0,01 %, lo que demuestra es que ambas coordenadas comparten el mismo recurso solar de partida. Este hallazgo crea la necesidad de la corrección metodológica aplicada, y aporta un resultado de interés propio del documento: un script para la selección territorial sin el control de resolución espacial frente a la fuente meteorológica empleada invalida una comparación de distintas zonas, esto puede ser transferible a cualquier estudio de similitud.

Una vez corregido el script de selección de parcelas representativas (Anexo C. 2), como se explica en la Fase 5, se ejecutó la simulación en PVSyst para las tres zonas representativas (Tabla 13). Los resultados se resumen en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados de la Simulación en PVSyst

Zona	Producción (kWh/año)	Producción específica (kWh/kWp/año)	PR (%)
Muy Alta	178.534	1.803	85,19
Alta	174.991	1.768	85,40
Media	175.137	1.769	85,27

Elaboración Propia

Estos resultados representan lo esperado con respecto a la escala de idoneidad. La zona de Muy Alta idoneidad alcanza una producción específica de 1.803 kWh/kWp/año, lo que representa un incremento cercano al 2,0% respecto a las zonas Alta (1.768 kWh/kWp/año) y Media (1.769 kWh/kWp/año). No obstante, entre las clases Alta y Media, la variación en el rendimiento energético es mínima, situándose la zona Media por encima de la Alta por 146 kWh/año o 0,08% en la producción anual en término absoluto. Esto va ligado totalmente al análisis WLC realizado, el orden entre las clases de idoneidad no es exclusivamente la variabilidad en la radiación solar, por el contrario,

abarca un conjunto de condiciones que la determinan, entre estos están las condicionantes orográficos, de capacidad agrológica y de accesibilidad a la infraestructura de red.

7.4. Relación entre el índice de idoneidad y la producción energética obtenida.

Si se compara la información entre el mapa de idoneidad territorial, obtenido a partir de la evaluación WLC, y la producción energética simulada mediante PVSyst nos permite matizar el alcance con estas herramientas. En el mapa se logra identificar lo asertivo del WLC, en donde el emplazamiento de mayor potencial (Muy Alta) no debe interpretarse como una guía para la producción energética entre las clases intermedias (Alta y Moderada), pues el recurso solar no es el factor determinante y discriminante entre las clases, pues depende de otros factores.

Esto es coherente con la ponderación en el diseño propio del índice WLC, en el cual el recurso solar (25%) es considerado junto a otros criterios no energéticos—capacidad agrológica del suelo (20 %), proximidad a subestaciones y red de alta tensión (15 %), exclusión de espacios Red Natura 2000 (15 %), pendiente inferior al 15 % (10 %), orientación (5 %) y accesibilidad viaria (10 %)—. Dos superficies pueden ser total mente distintas en su idoneidad por razones de accesibilidad o proximidad a red, sin que esto contenga singularidades proporcionales en cuanto al recurso solar. PVSyst, depende únicamente de la meteorología y las condiciones del sistema en cada ubicación, no captura estas dimensiones no energéticas del índice.

Es importante añadir que el valor del GHI anual que se obtuvo en las simulaciones de PVSyst (alrededor de 1.805 a 1.841 kWh/m²/año, según la zona), lo cual resulta superior al rango empleado de Global Solar Atlas (1.455–1.698 kWh/m²/año) para la Comunidad de Madrid. Esto es atribuido a las diferencias metodológicas de ambas fuentes (PVGIS-TMY en PVSyst frente a Global Solar Atlas/Solargis en QGIS), y no a algún error durante las simulaciones. No obstante, si se convierte en una limitación que debe ser tenida en cuenta para comparar los valores del recurso solar en términos absolutos, y es fundamental que en una línea futura para la validación cruzada se realice incluyendo una tercera fuente o, alternativamente, el uso de una única fuente de radiación en ambas fases.

Los resultados sugieren que el índice de idoneidad y la simulación energética cumplen funciones complementarias no sustitutivas en la metodología. El análisis por medio de SIG, y llevado a cabo con la WLC, es indispensable como herramienta de selección territorial, mientras que la segunda resulta en una confirmación importante para que la clasificación de la idoneidad sea contrastada, en cada territorio observado, con la producción energética para la toma de decisiones.

7.5. Estimación del impacto económico y social

Estos resultados que se obtuvieron permiten estimar el impacto económico y social del despliegue de la APV en la Comunidad de Madrid. Es importante resaltar que el análisis económico detallado queda fuera del alcance del trabajo, las estimaciones presentadas en este apartado tienen un carácter orientativo y se apoyan en supuestos declarados, estos requerirán de verificación si se emplean estudios específicos.

Por otro lado, es importante aclarar que la tasa de descuento (5%) y el coste de operación y mantenimiento (1,5% del CAPEX anual) corresponden a valores de referencia habituales en la literatura de evaluación económica de sistemas PV. A diferencia de la convención por defecto, que en el propio informe de Fraunhofer ISE menciona como precios nominales salvo indicación contraria, todos los valores monetarios en esta sección son expresados en euros constantes, sin proyección de inflación en el CAPEX o OPEX.

7.5.1. Producción a lo largo de la vida útil

El sistema simulado, de 99 kWp, alcanza en la zona de idoneidad Muy Alta una producción de 178.534 kWh, en su primer año de operatividad. Con un factor de degradación anual del 0,4% de la configuración empleada, la producción del año 25 se sitúa en 162.160 kWh, un 90,8% de la inicial. La producción acumulada en la vida útil de 25 años serían 4.256 MWh, con media anual de 170.221 kWh.

Con esta base se estima el coste normalizado de la energía, el cual se expresa como:

Fórmula 6. LCOE

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum OPEX}{\sum Energía\ actualizada}$$

Considerando tasas de descuento del 5%, la energía actualizada a lo largo de la vida útil asciende a 2.423 MWh.

Fórmula 7. Energía actualizada

$$E_{actualizada} = \sum_{t=1}^{25} \frac{E_0 * (1-\delta)^{t-1}}{(1+r)^t}$$

Donde E_0 es la producción del primer año (178.534 kWh), δ la tasa de degradación anual (0,4%) y r la tasa de descuento (5%).

7.5.2. Costes y sobre costes APV

La diferencia entre una PV y una APV reside fundamentalmente en la estructura de soporte, esta debe elevarse alrededor de 4 metros y contar con una separación entre filas de 12 metros para que la maquinaria agrícola transite y así mismo se permita la captación de radiación al cultivo. Como es el caso expuesto en este estudio.

El Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems establece un coste de referencia de 572 €/kWp para una planta PV sobre el suelo, y para una APV de modelo elevado supone 1.234 €/kWp (Fraunhofer ISE, 2021), mostrando un sobrecoste de alrededor de 116%. Para este estudio se obtienen los siguientes valores recogidos en la Tabla 20.

Tabla 20. Estimación de costes del sistema APV (99 kWp)

Concepto	**Fotovoltaica sobre suelo**	**Agrivoltaica elevada**
Costo unitario de instalación	572 €/kWp	1.234 €/kWp
CAPEX	56.628 €	122.166 €
Operación y mantenimiento anual (1,5 % del CAPEX)	849 €/año	1.832 €/año
Valor actualizado del OPEX (25 años, 5 %)	11.972 €	25.827 €
Costo total actualizado	68.600 €	147.993 €
LCOE	2,83 c€/kWh	6,11 c€/kWh

**Nota: coste de operación y mantenimiento, tasa de descuento y vida útil son supuestos de cálculo. Costes unitarios según Fraunhofer ISE (2021). Fuente: elaboración propia.*

El sobrecoste de la estructura elevada asciende a 65.538 €, para este sistema considerado, y se traduce a un costo normalizado de la energía de 2,2 veces superior al de una instalación PV convencional equivalente.

Sin embargo, es importante contrastar el valor que se obtiene con la referencia del propio estudio alemán. El Fraunhofer ISE sitúa el LCOE de los APV en Alemania entre los 0,07 y 0,12 €/kWh, con un promedio de 0,093 €/kWh (Fraunhofer ISE, 2021). El valor estimado para este estudio se sitúa cerca de 34% por debajo de esta media, incluso inferior al rango alemán, con 0,061 €/kWh. La diferencia es debido al recurso solar, la producción obtenida de 1.803 kWh/kWp/año, prácticamente se duplica en comparación a la latitud alemana. Las condiciones energéticas favorables de la APV en este territorio pueden contribuir a que sea más económicamente viable.

Es importante resaltar que en una edición más reciente del mismo informe de Fraunhofer ISE (2026) reporta un coste instalado de PV en Alemania de 758 €/kWp para 2025, un incremento de 29% respecto al valor empleado del 2021, atribuible a los costes de instalación y financieros. No obstante, el promedio ponderado mundial es de 595 €/kWp (IRENA, 2026), próximo valor base utilizado, lo que aún posiciona la cifra de 572 €/kWp como representativa a escala global.

7.5.3. Ocupación del suelo

Ahora bien, no nos podemos quedar únicamente con la comparación del costo por kilovatio hora de una planta de APV, dado que su valor reside en el mantenimiento simultaneo con la actividad agrícola. La comparación debe tener en cuenta: explotación agrícola sin la instalación, la instalación PV y el sistema hibridado.

La configuración del estudio consta de 180 módulos, una cobertura del suelo del 19,2%, con una superficie de 0,24 ha aproximadamente, arrojando una densidad de potencia de 406 kWp/ha. Este valor se contrasta con los 850 kWp/ha de la PV de

referencia, y los 650 kWp/ha del sistema APV alemán (Fraunhofer ISE, 2021). La densidad disminuida responde a la separación entre filas, condicionado por los requisitos de la maquinaria requerida en viñedos.

De esto se pueden tener en cuenta dos cosas: el sistema requiere el doble de superficie que una planta convencional. Y, en segundo lugar, que la superficie no reemplaza el uso agrícola, por el contrario, lo mantiene, mientras que la PV lo desplaza totalmente durante toda la vida útil de la planta.

Para este balance, se requiere el cálculo del Land Equivalent Ratio (LER), indicador que nos muestra la superficie necesaria para ambos usos por separado para obtener la producción del conjunto del sistema, su determinación exige un modelo agronómico de crecimiento del cultivo. Dicho acoplamiento queda por fuera del alcance de este estudio, y se plasma en las futuras líneas de trabajo, en el apartado 11.2.

Además, es importante señalar que una comparación con una PV convencional no es la que realmente se plantea en el contexto normativo madridleño. El 4% restringe el suelo disponible para la convencional; la finalidad no es cual produce más energía sobre una misma parcela, sino brindar a la comunidad de una alternativa para la seguridad alimentaria y objetivos energéticos, ambos para enfrentar las necesidades de la población frente al CC y la transición energética.

7.5.4. Escalabilidad territorial

Adicionalmente, si se estima la potencia estimada a la totalidad de las ha de OV y VI, 19.872,7 ha, teóricamente se situaría en 8.068 MWp. Esto, tratándose de una suposición íntegra de la superficie integrada, útil para efectos del estudio.

En la tabla 21 se recogen dos escenarios de implantación parcial, formulados como referencia de escala.

Tabla 21. Escenarios de implantación agrivoltaica sobre OV y VI de idoneidad Alta y Muy Alta

Escenario	Superficie	Potencia instalada	Generación anual	Inversión estimada
5 % de la superficie identificada	994 ha	404 MWp	728 GWh/año	498 M€
10 % de la superficie identificada	1.987 ha	807 MWp	1.455 GWh/año	996 M€

**Nota: generación calculada con la producción específica de 1.803 kWh/kWp/año obtenido en la simulación de la clase Muy Alta. Fuente: elaboración propia.*

La magnitud obtenida, si se trata de un escenario conservador, debe ser contextualizada al consumo eléctrico de la Comunidad de Madrid, con la finalidad de valorar su contribución a los objetivos regionales, teniendo en cuenta otros factores como posibles despliegues de plantas aisladas con o sin excedentes.

Es relevante subrayar que estas cifras no contienen la capacidad efectiva de evacuación a la red, estructura de la propiedad de la tierra, disposición de los titulares a realizar este tipo de producción. Su función es situar el resultado en términos energéticos y económicos comprensibles.

7.5.5. Impacto social

Por otro lado, el despliegue APV presenta implicaciones sociales importantes:

Uno de estos es el mantenimiento de la actividad y la renta agraria. A diferencia de la PV, que suspende la actividad ejercida en el territorio durante su vida útil, el modelo APV permite al titular mantener la producción, lo que añade el ingreso complementario de la energía eléctrica. Esto incide en la rentabilidad del suelo y el beneficio al agricultor o inversor.

Así mismo la aceptación social juega un papel importante, el despliegue de las PV ha sido obstaculizado, ya que desplaza actividades usuales en el territorio, ya se ha mencionado la limitación del 4% en Madrid, lo que ayuda a encajar a la APV como un modelo que integra ambas producciones, y de ambas se es beneficiado, pues la negativa no es frente a las energías renovables, sino frente a la pérdida de suelo productivo y de paisaje agrario.

Y, para la distribución del valor agregado, el modelo APV es compatible con otras formas de participación, entre estas están el autoconsumo compartido, las comunidades energéticas, que retienen un valor interesante sobre el territorio. Modelos de grandes plantas, cuyos rendimientos van por fuera del ámbito rural en el que se implanta son variables que vale la pena tener en cuenta y que se pueden beneficiar de esta tecnología. Esto dependerá de: el diseño de incentivos y escala de instalaciones, cuestiones que exceden el alcance del estudio, pero condicionan el impacto social real de la tecnología.

7.6. Gestión de residuos y fin de vida útil de los sistemas APV

La gestión responsable de los materiales a lo largo del ciclo de vida (CV) es un tema que no puede ser pasado por alto al hablar de sostenibilidad, en particular porque el sistema elevado de la APV exige mayor consumo de acero y aluminio que una instalación convencional (el sobrecoste estructural de 116% plasmado en el apartado 7.5.2). Ese uso mayor de material se traduce, al final de la vida útil del sistema PV (25 años, según lo estimado durante el trabajo), en un volumen superior de residuos que debe gestionarse conforme a la Directiva 2012/19/UE sobre los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) (Real Decreto 110/2015 en España), el cual fija un objetivo de recuperación del 85% y del 80% de reciclaje para los módulos PV.

En términos de proceso, es conveniente diferenciar dos flujos: la estructura de soporte sigue rutas de reciclaje de chatarra metálica ya consolidadas, admitiendo incluso reutilización directa al sustituir los módulos, pues su durabilidad puede ser mayor a la de los módulos. Por otro lado, las células PV requieren de procesos de separación mecánica y tratamiento térmico o químico para recuperar materiales como el vidrio, el silicio y metales. Esto no es solo teórico, el gestor francés Soren reportó en 2024 una tasa de reciclaje del 86,81% sobre 7.143 toneladas procesadas (IEA-PVPS, 2025), lo que supera el mínimo exigido por la normativa europea. A escala global, el volumen acumulado de residuos PV podría superar los 200 millones de toneladas para 2050 (EIA-PVPS, 2025),

confirmando que la planificación del CV debe ser tenida en cuenta desde la fase previa, no desde el despliegue consolidado.

Aunque el diseño del desmantelamiento y el plan de gestión de residuos quedan por fuera del alcance del estudio, es necesario mencionarlo y tenerlo en cuenta para evitar pasivos ambientales sin resolver en el futuro, y refuerza el compromiso que se plantea el despliegue de la APV en la Comunidad de Madrid, pues no es suficiente con producir energía limpia, el análisis de ciclo de vida (ACV) debe contener la misma rigurosidad con la que se estudia el despliegue de las nuevas tecnologías.

8. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones de este estudio, las cuales están organizadas según el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados en la sección 3. Luego de haberlos respondido estos, se complementa con los hallazgos adicionales, que van más allá de lo planteado.

Los resultados confirmaron la hipótesis de partida, la restricción del 4% del suelo establecida en la Comunidad de Madrid (Anexo 4), no supone un impedimento para el despliegue de la APV, sino que define un marco territorial para el despliegue responsable y sinérgico con los usos del suelo agrícola. El mapa de idoneidad desarrollado (Anexo 9), complementando con la validación energética en PVSyst, cumple con el propósito planteado: Identificar y cartografiar las zonas óptimas para la APV en la Comunidad e Madrid, y contrastar estos resultados con los datos técnicos de producción energética.

La Red Natura 2000 (Anexo 6) y el suelo urbanizado (Anexo 8) se incorporaron como restricciones absolutas del modelo (apartado 6.4), lo que garantizó que ninguna zona de exclusión ambiental o legal sea destinada al despliegue de la APV. Es importante señalar un matiz metodológico relevante: la verificación del comportamiento efectivo, mencionado en el apartado 11.1.2, reveló que el peso nominal del 15% asignado a la Red Natura 2000 no interviene en el cálculo final, pues queda totalmente anulado por la máscara de exclusión. El objetivo se cumple igualmente: el territorio protegido queda excluido, pero esto evidencia una redundancia en la formulación del modelo que se propone corregir como línea de mejora.

Por otro lado, se incorpora la capacidad agrícola del suelo como criterio no restrictivo dentro del modelo de evaluación, priorizando las clases 3 y 4 para la hibridación (Anexo 2), en línea con el estudio de Dupraz et al. (2011) y Schindele et al. (2020). Este criterio fue el más determinante del resultado final, pues el análisis de sensibilidad el modelo (apartado 6.10) muestra que la capacidad agrícola domina la variación de los índices, muy por encima por el 20% que se sugería, lo cual también confirma la decisión de tratar el criterio como positivo (no solo restrictivo, como se observa en los estudios de referencia).

El mapa de idoneidad (Anexo 9) demuestra la existencia de 204.249,5 ha con condiciones favorables (Alta y Muy Alta idoneidad) para la hibridación APV, de las que 19.872,7 ha corresponden a parcelas de OV y VI, en estas categorías superiores de idoneidad superiores. Esta superficie, muy por encima del límite de las 32.000 ha de la

limitación del 4% (Anexo 4) para PV convencionales, confirma que los municipios saturados por dicho límite cuentan con alternativas de expansión renovables viables, como en este caso la APV.

El mapa de idoneidad resultante (Anexo 9, Tabla 16, Ilustración 17 y 18) cumple el objetivo de ser una herramienta de preselección a nivel territorial, la cual apoya la toma de decisiones para el despliegue de la APV, y no como criterio único o determinante para la implantación de los proyectos. Además, la integración de los datos del SIGPAC (Anexo 10) permitió trascender el análisis territorial abstracto para identificar parcelas agrícolas concretas, con potencial real de implantación (Anexo 11), criterio ausente en estudios consultados (Dere et al., 2023; Brent et al., 2024).

Ahora bien, durante la fase de validación energética (Fase 5) se refuerzan las conclusiones cartográficas. La simulación llevada a cabo en PVSyst confirma que en las tres zonas representativas la clase Muy Alta produce la mayor energía específica (1.803 kWh/kWp/año), pero también revela que entre clases Alta y Media la diferencia es mínima, prácticamente nula. Esto no contradice la validez del modelo WLC, al contrario, ilustra la naturaleza de la APV: integra criterios no energéticos junto con el recurso solar, lo que establece al índice de idoneidad fuera de una lectura de predicción lineal de producción entre las clases, al menos las intermedias, sino como una herramienta de diferenciación y filtrado territorial que debe combinarse con la validación energética puntual antes de tomar la decisión de la implantación de un sistema APV.

Sin embargo, se identificaron limitaciones inherentes a la escala territorial. La resolución de 26,39 metros es adecuada para el análisis regional, pero puede llegar a ser insuficiente en la toma de decisiones a una escala específica de parcela, pues la micro-orografía, la variedad de cultivos, la capacidad de conexión real a la red puede determinar la viabilidad de un proyecto en la última instancia. Estas limitaciones identificadas en la sección 4.6, definen las futuras líneas de trabajo que serán descritas en el apartado 10.

Por otro lado, el análisis de sensibilidad que se realizó sobre el criterio de selección de puntos representativos nos revela una coincidencia de celda climática entre dos zonas inicialmente distintas, y constituye una aportación metodológica en el mismo proceso. Esto, puede ser transferido a cualquier estudio en el que las SIG sean combinadas con las fuentes climáticas globales de menor resolución, y de la cual se puede llegar a una rigurosidad territorial mayor, siempre y cuando se establezcan recursos con una resolución ligada a la escala deseada.

Finalmente, es importante resaltar el sobrecoste estructural que puede ser un penalizador de la viabilidad de la APV; sin embargo, este queda compensado en el territorio mediterráneo gracias a la superioridad del recurso solar que allí hay. Frente al caso alemán —única referencia con datos de LCOE comparables en este estudio (Fraunhofer ISE, 2021)—, la APV puede ser económicamente más viable en la Comunidad de Madrid gracias a su mayor recurso solar; extender esta afirmación a otros territorios donde la tecnología se ha desarrollado y ensayado excedería el alcance

comparativo de este trabajo, aunque representa una oportunidad a explorar para su futura ejecución.

9. RECOMENDACIONES

En este sentido es recomendable que el despliegue sea en los terrenos clasificados como idoneidad Alta y Muy Alta, y, en el sentido de este estudio, correspondan a cultivos de olivar y viñedo, dado el sólido potencial para una sinergia agroenergética. Además, se recomienda emplear este mapa como orientativo ante una planificación pública, para la priorización de zonas candidatas para la APV, pero no como el único criterio decisivo del territorio. Adicionalmente, es imprescindible amplificar los cultivos recomendados, la integración catastral del SIGPAC es imprescindible para ampliar la visión de la tecnología.

Con la finalidad de maximizar la transferencia práctica de este análisis a proyectos reales, es importante complementar la clasificación territorial con la validación energética específica de cada sitio, simulaciones como la llevada a cabo en este estudio, y sus equivalentes, son indispensables para tomar decisiones previas a la ejecución, pues cabe recordar que la variación entre los índices de idoneidad no es necesariamente proporcional a la producción energética.

Finalmente, con respecto al marco normativo y gobernanza del territorio, se sugiere que las futuras regulaciones continúen siendo diseñadas espacialmente, pero que incorpore los modelos de idoneidad espacial, como la que se ha llevado a cabo en este documento, y con esto, se tengan en cuenta distintas tecnologías y usos duales del suelo que sean beneficiosos y soporten la resiliencia climática del territorio. Esto permitirá optimizar la distribución de la superficie y asegura que la implantación de la tecnología corresponda a los criterios de eficiencia y sinergia territorial

10. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como marco global para la transición hacia un modelo de desarrollo que equilibre el bienestar humano, la equidad social y la sostenibilidad ambiental, o, en pocas palabras, el *desarrollo sostenible* (Naciones Unidas, 2015). La APV, por su beneficio dual e integrador, no sujeta un único objetivo de esta agenda, establece vínculos directos y sinérgicos con varios de ellos, siendo un ejemplo representativo de cómo una tecnología puede articular metas de distinta naturaleza al mismo tiempo. A continuación, se identifican los ODS que directamente se relacionan con el despliegue de sistemas APV en el contexto de la Comunidad de Madrid, y cómo este proyecto aporta para la vinculación de estos.

10.1. ODS 2 — Hambre Cero.

La seguridad alimentaria es uno de los pilares sobre los que se asienta la APV. Mientras que las instalaciones PV tradicionales desplazan el uso agrícola del suelo, la APV lo potencia en determinadas condiciones, así mismo, mantiene la productividad agronómica sobre la misma superficie (Dupraz et al., 2011). En el contexto madridleño, donde la Comunidad ha prevenido sobre el impacto de las macro plantas PV, que se plasman sobre suelos de alto valor productivo, como olivares y viñedos (Comunidad de Madrid, 2026), la APV se posiciona como una solución tecnológica que permite avanzar en la transición energética sin comprometer la capacidad alimentaria. Los beneficios agronómicos mencionados en este proyecto—reducción del estrés hídrico, protección frente a eventos meteorológicos extremos y estabilización de rendimientos (Weselek et al., 2019)—refuerzan la contribución de este sistema para el sector agronómico, y, instaura una herramienta para hacer frente al CC.

Este estudio es clave para un despliegue organizado, que aproveche los recursos de manera adecuada, no solo para la seguridad alimentaria y la diversificación energética que hemos venido comentando anteriormente, sino que también para adaptar aquellos sectores más vulnerables a los constantes cambios climáticos que hemos estado percibiendo. El sector agrícola no es solo un proveedor de bienes para los núcleos urbanos; el desarrollo de herramientas que aseguren estabilidad, rentabilidad y resiliencia al agricultor son, en instancias finales, un pilar fundamental para la seguridad alimentaria global.

10.2. ODS 7 — Energía asequible y no contaminante.

La generación de energía limpia es el otro motor de la APV. En España, donde la fotovoltaica representaba cerca del 30% de la potencia instalada en 2025 (Red Eléctrica de España, 2026), la APV ofrece un nuevo camino para continuar expandiendo la capacidad renovable sin aumentar la presión que se ejerce sobre el suelo no agrícola, siendo relevante para el cumplimiento de las metas de la Directiva RED III, en donde se establece el objetivo del 42,5% de energía renovable para 2030 (Parlamento Europeo, 2023). En la Comunidad de Madrid, donde la generación PV representa apenas el 0,2% de la potencia instalada a nivel nacional, el potencial de crecimiento es latente, y la APV puede contribuir a este dentro de los límites normativos del 4% establecidos por la administración, transformando, así, una restricción en una oportunidad de generación distribuida y multifuncional.

A lo largo de la redacción de este trabajo se han visto conceptos importantes sobre el CC, pero, fundamentalmente se ha enfatizado en la descarbonización responsable de las matrices energéticas, la finalidad de este tipo de proyectos es la planificación adecuada y consciente de las energías renovables, y como la indagación y la creatividad científica no pueden quedarse únicamente en producir desde fuentes renovables, sino como estas se integran a la matriz desde la polifuncionalidad, distintas disciplinas y distintos sectores en un mismo estado: la colaboración. Es así, como los SIG funcionan como puntos de partida para el despliegue de estas fuentes no contaminantes, y como el aporte multidisciplinar es la clave para la extensión de las energías alternativas, hasta ahora.

10.3. ODS 11 — Ciudades y comunidades sostenibles.

La ordenación del territorio debe ser equilibrada y responsable, y esta es una condición rotunda en la postura de la Comunidad de Madrid frente al despliegue de energías renovables, buscando priorizar la coexistencia de usos del suelo y la protección del paisaje productivo (Comunidad de Madrid, 2026). El mapa de idoneidad desarrollado en este trabajo contribuye directamente a este objetivo, pues proporciona una herramienta de planificación territorial que facilita la toma de decisiones basadas en evidencia para saber sobre dónde y cómo implantar los sistemas APV, así mismo, minimiza conflictos de uso del territorio y promueve la multifuncionalidad como principio de ordenación. La integración de criterios normativos, agrológicos e infraestructurales en este modelo de evaluación multicriterio refleja esta visión de un desarrollo territorial sostenible posible.

Para el desarrollo del proyecto es fundamental asegurar una transición y una dirección territorial conforme a las necesidades de la Comunidad, por esto, la razón de estudiar la APV y su despliegue sensato es clave para una sociedad sostenible, desde la polifuncionalidad y la seguridad energética para todos. El sector agrícola, como se ha mencionado antes, es un pilar de la sociedad, que debe ser resguardado, estudiado y asistido por todas las disciplinas que pueden impulsarlo hacia el desarrollo, y mucho más, cuando estamos frente a cambios inminentes en el clima.

10.4. ODS 13 — Acción por el clima.

La APV contribuye a la mitigación del CC a través de la generación de energía renovable, sustituyendo aquellas fuentes de emisión de gases de efecto invernadero, además, ofrece capacidades de adaptación ante estas anomalías para el sector agrícola. El IPCC (2023) señala que la producción agrícola en Europa se verá afectada considerable y paulatinamente por los cambios en factores climáticos como el calor, la sequía y condiciones climáticas extremas, allí, las medidas de adaptación convencionales perderán efectividad partir de un aumento de 2°C en la temperatura global. En este escenario, la infraestructura del sistema APV actúa como un escudo frente a eventos meteorológicos extremos—granizo, heladas, excesos de radiación—y como regulador del microclima del suelo, posicionándose como una medida de adaptación agrícola al CC con doble beneficio energético (Weselek et al., 2019; Schindele et al., 2020).

Tomar acción es, y debe, ser parte de todos, la sociedad va adquiriendo la necesidad, cada vez más, de transición, de adaptación, hacia terrenos poco explorados gracias a la explotación masiva e irresponsable. Por esto, la viabilidad de este proyecto es dada por la operación primaria que hará mover esta nueva rueda, es ese primer engranaje de un movimiento hacia la conservación de los ecosistemas.

10.5. ODS 15 — Vida de ecosistemas terrestres.

La protección de la biodiversidad y de los suelos con valor ecológico es un pilar en este proyecto, al ser un criterio de exclusión del modelo de idoneidad desarrollado, esto, a través de la incorporación de la Red Natura 2000 como capa de restricción del territorio. Esta decisión en la metodología refleja el compromiso de este estudio y de la APV con la preservación de los ecosistemas y las aves, evitando que la expansión de las fuentes renovables sea conflictiva para los hábitats protegidos. Adicionalmente, experiencias locales, como la del proyecto de Endesa en Totana (Murcia), demuestra que la integración de corredores ecológicos, vegetación autóctona y ganadería extensiva dentro de la instalación APV (Endesa, 2023), puede diseñarse con la finalidad de favorecer la biodiversidad y la comunidad local, más allá de únicamente evitar de impactos negativos.

En conjunto, la APV no debe ser entendida únicamente como una solución energética o agrícola—sectorizado—, sino como una tecnología de integración del territorio, con capacidad para articular metas climáticas, alimentarias, energéticas y de ordenamiento territorial. Esta polifuncionalidad es precisamente la que justifica el análisis exhaustivo de la APV desde una perspectiva geoespacial multicriterio y la que le otorga al presente trabajo su importancia, trascendiendo el ámbito técnico para implantarse en el marco más amplio del desarrollo sostenible y la lucha por el CC.

11. PERSPECTIVAS Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.

El presente estudio ha permitido delimitar el potencial territorial que tiene la APV en la Comunidad de Madrid, y, con este, validar energéticamente los emplazamientos que se identificaron. Ahora bien, en el apartado 5.10, durante la verificación del comportamiento efectivo del modelo se reveló un conjunto de propiedades en la formulación inicial que no se esperaba, y que sitúan al modelo, y su calibración, como una de las tareas más relevantes junto con su aplicación. A esto se suman las delimitaciones de escala encontradas en el apartado 4.6.

Las propuestas a continuación están organizadas en tres ejes. El primero agrupa la consolidación del modelo, que pueden ser abordados a corto plazo y con datos disponibles. El segundo reúne la profundización a tener en cuenta para la validación energética y agronómica, con recursos adicionales y alguna colaboración interdisciplinar. El tercero contempla la transferencia de modelos a distintos contextos de aplicación real y su sinergia con el marco institucional.

11.1. Consolidación y Calibración del modelo

Las líneas de trabajo acá agrupadas pueden ser llevadas a cabo con los datos recopilados y sin influencia de recursos adicionales. Su ejecución no requiere ampliar el estudio, sino profundizar en decisiones de implementación cuyas consecuencias son visibles únicamente al auditar el modelo.

11.1.1. Corrección de las distancias de referencia en la normalización

En el apartado 5.10 se pone en manifiesto lo evidenciado, los criterios de accesibilidad viaria e infraestructura eléctrica, a pesar de tener un peso de 25% en el modelo, solo aportan un 0,4% de variación en el índice. La causa raíz no es de la ponderación, sino de

las distancias de referencia para la puntuación mínima: al fijar un valor entre 59 y 64 km, correspondiente a los terrenos fuera de los emplazamientos evaluables, la totalidad de parcelas queda comprimida a la parte más alta de la escala.

La corrección radica en establecer una referencia en un valor efectivamente observado. En el caso de las vías de acceso se reduciría de 59.140 a 581 m, al mantenerlo en un percentil de 95 o 99 porciento, y esta multiplicaría por 100 la capacidad discriminante de este criterio, sin tener que modificar su peso. Es una línea de mejora de buen rendimiento, que no requiere un esfuerzo mayor, requiere recalcular tres capas normalizadas y re-ejecutar la superposición ponderada, con los datos ya disponibles.

11.1.2. Simplificación de la formulación del modelo

La verificación de la implementación de la fórmula reveló que el criterio de la capa Red Natura 2000, con un peso de 15%, no interviene al final en el cálculo de ningún píxel evaluado, pues este queda anulado en la máscara de exclusión que actúa sobre este mismo concepto. Es una redundancia que no afecta el resultado cartográfico, pero que altera el reparto de los criterios en la ponderación, en este caso si restamos el 15% al 100% estaríamos evaluando sobre un 85%.

Lo propuesto consiste en separar las restricciones absolutas de los criterios compensatorios, redistribuir pesos, y reformular la Tabla 3 como consecuencia de esto. El beneficio no será de precisión, pues la idoneidad no variará, sino de transparencia del proceso, el que permitiría describir el comportamiento real del modelo, sobre un 100%.

11.1.3. Validación de la ponderación mediante consulta a expertos

La asignación de pesos aplicada en el trabajo procede de la literatura referenciada, con algunos ajustes (argumentados), procedimiento habitual pero subjetivo en este caso, como es reconocido en el apartado 4.6. La divergencia evidenciada entre el peso declarado y su influencia real sobre el resultado valen la pena ser revisados.

Esto consiste en someter la ponderación a un procedimiento de formalización en la agregación de estos pesos, consultando expertos, realizando y ejecutando trabajo en campo, evaluando en tiempo real el comportamiento de proyectos reales. Por otro lado, están los procesos analíticos jerárquicos, AHP o FAHP mencionados en el apartado 2.4 Uyan, 2013; Noorollahi et al., 2016; Colak et al., 2020). Este requiere construir un panel multidisciplinar (Agrícola, ordenación del territorio, conservación, ingeniería eléctrica) para alcanzar la consistencia correspondiente que vale la pena aplicar en este tipo de proyectos.

11.1.4. Análisis de sensibilidad mediante escenarios alternativos para la ponderación

Una vez son evaluados los pesos se procede a evaluar la estabilidad de los resultados frente a las variaciones deliberadas de la ponderación. La formulación de escenarios contrastados (por ejemplo, uno de prioridad agronómica, otro con prioridad energética, otro de prioridad infraestructural) permitirá determinar que superficie mantiene la clasificación independientemente del escenario.

Las zonas estables construirán un núcleo territorial robusto, defendible ante cualquier criterio de priorización; las zonas variables señalarían en dónde la decisión depende de decisiones de condición física o política. Esto resulta especialmente valioso para una herramienta de decisión.

11.1.5. Revisión de la reclasificación de la capacidad agrológica

Es importante revisar la asignación de valores para las clases agrológicas que no ocupan este estudio, recordemos que se tuvieron en cuenta las clases 3 y 4, y el resto obtuvieron un valor de 0, por lo que sería interesante evaluarlo sobre otras clases agrícolas. Esto requeriría de respaldo agronómico específico, sobre el comportamiento en cada clase y las condiciones que generan los módulos, ya que no se proporcionó en la literatura.

11.1.6. Unificación de rejillas de trabajo

El proyecto opera con dos tamaños de píxel ligeramente distintos, los cuales salen de las re-proyecciones sucesivas del DEM. Aunque es un efecto que no afecta el resultado en grandes cantidades (0,5%) la unificación de estas eliminaría una imprecisión, mínima, pero innecesaria, y simplificaría cualquier reutilización de capas a futuro.

11.2. Validación energética y agronómica

En este eje se agrupan las líneas realizadas en la Fase 5, ampliando su alcance con recursos adicionales como mayor capacidad de simulación, acceso a series climáticas de observación o colaboración con perfiles agronómicos.

11.2.1. Ampliación del muestreo mediante la estratificación aleatoria

La validación energética fue ejecutada en un único punto representativo por clase de idoneidad, lo que impide caracterizar la variabilidad interna en cada categoría. La diferencia entre la idoneidad Alta y Media puede reflejar podría reflejar la propiedad real del modelo como el efecto de la posición concreta de los puntos elegidos.

Esta línea consistiría en aplicar un muestreo aleatorio con un número suficiente de puntos por clase, respetando la separación mínima impuesta por la resolución de la fuente climática, tal como se estableció en el apartado 5.8. Esto permitiría al modelo visualizar un intervalo de producción y no un valor específico, y determinar si estas diferencias de clases intermedias son, o no, significativas. Requiere varias simulaciones en PVSyst.

11.2.2. Sensibilidad de la producción con respecto a la estructura

Para este estudio se determinó un emplazamiento estándar, con una altura de pivote de 4 m, separación entre filas de 12 m e inclinación de 20°, para verificar el recurso en las ubicaciones. Sin embargo, aunque la decisión fortalece el estudio, impide determinar si el diseño es el óptimo o no para cada zona.

Por esto, es importante explorar esa sensibilidad en la producción frente a la estructura PV, frente al recurso, el emplazamiento y el cultivo. El beneficio esperado es la definición de configuraciones de referencia que se adapten a cada contexto, en lugar del diseño único establecido. La Fase 5 aporta un punto de partida favorable: la pérdida

por sombreado eléctrico registrada con la configuración empleada fue del 0,23 %, margen que sugiere evaluar otras configuraciones para no penalizar la producción.

11.2.3. Validación cruzada del recurso solar

En el estudio se constata la diferencia entre los rangos de irradiación que se pueden presentar entre la fuente de la fase cartográfica: Global Solar Atlas, y los valores obtenidos de PVGIS-TMY en la fase de simulación. La diferencia responde a distintas metodologías de estimación, pero no a errores de cálculo, pero puede impedir comparar valores absolutos entre ambas fases.

Para esto, contrastar ambas series con registros de la red de estaciones meteorológicas AEMET de la comunidad de Madrid resulta indispensable, pues permite determinar el que mejor se ajusta a las condiciones locales, y, en caso tal, aplicar un factor de corrección al criterio. Y, posteriormente, evaluarlo con la misma fuente en ambas instancias.

11.2.4. Evaluación económica a lo largo de la vida útil

La simulación proporciona la producción del primer año de operación, magnitud suficiente para valorar la viabilidad de un proyecto. Sin embargo, es importante incorporar un cálculo normalizado de la energía (LCOE) a lo largo de la vida útil de la instalación, aplicando factores de degradación, e integrando costes diferenciales de la estructura elevada, respecto a una convencional. Esto permitirá evaluar los modelos de negocio aplicables al contexto madridleño, cuestión determinante para la viabilidad real de la tecnología en los emplazamientos.

11.3. Transferencia y escala

Este eje contempla el paso de un análisis regional a una decisión concreta, además de su articulación con el marco institucional. Son líneas planteadas a una aplicación del modelo fuera de un ámbito académico.

11.3.1. Descenso a la escala de la parcela

La resolución resulta adecuada para un análisis regional, sin embargo, resulta complejo tomar una decisión para una explotación concreta. Hay factores como la micro-orografía, variedad y macro plantación del cultivo, tendencia de las tierras y su capacidad real de evacuación en el punto de conexión cercano que no se capturan en el modelo y que serían factores determinantes.

Allí, es necesario un procedimiento de análisis de segundo nivel, que se aplique a las parcelas establecidas previamente a nivel regional en donde se incorporen estos factores. Esto podría sustituir el centroide asignado en el apartado 5.7 por una caracterización a nivel de la parcela.

11.3.2. Ampliación de los cultivos considerados

El estudio se estableció para viñedos y olivares, sin embargo, extender estos estudios para otros cultivos perennes en el territorio madridleño es de gran relevancia para proyecciones futuras. La capa del SIGPAC que se emplea permite extender este análisis, a otros usos

con potencial de hibridación, ya sea para continuar la línea de cultivos como la ganadería. Esta ampliación requeriría ajustar el filtro catastral y revisar los requisitos de la estructura. Su beneficio estaría en la estimación más completa de la tecnología APV.

11.3.3. Articulación con el marco normativo e institucional

Como ya se menciona, la Comunidad de Madrid anunció el Plan de Protección del Paisaje destinado a proteger el suelo agrícola y delimitar la implantación de la PV en el territorio (Comunidad de Madrid, 2025). En el ámbito estatal continúa abierto un programa de incentivos destinado específicamente a los proyectos innovadores de agrivoltaica (BOE, 23 de diciembre de 2025). La línea consiste en contrastar la cartografía de idoneidad obtenida, y contrarrestando con este programa para priorizar zonas dentro del límite del 4% establecido para su provecho. Requerirá articulación institucional, pero es la línea que mayor recorrido aplicado ofrece.

11.3.4. Transferibilidad a otras regiones

Los umbrales establecidos y la metodología empleada no son específicos para una región, esta puede ser aplicada a distintas poblaciones agrícolas mediterráneas con dinámicas de uso del suelo comparables a las aquí establecidas. Los umbrales de clasificación establecidos, fijados en valores redondos de la escala normalizada y no derivados de la distribución estadística, facilitan la transferencia y permiten comparar resultados obtenidos en distintos territorios.

11.3.5. Publicación del modelo como herramienta abierta

Los resultados de este trabajo se presentan con un formato cartográfico estático. Su publicación como un visor interactivo, acompañado de capas resultantes en formatos estándar y scripts de generación y verificación, permitirían su consulta directa por parte de las partes interesadas. Este paso convertiría esta cartografía a un uso efectivo y no a un ejercicio únicamente de evaluación, siendo coherente con el carácter público en la cual fue basada la toma de datos y la problemática de la adaptabilidad al cambio climático, en el ámbito energético y de agricultura.

Las líneas expuestas comparten una orientación en común, avanzar desde la delimitación del potencial hacia una decisión concreta. El modelo identifica las condiciones adecuadas para el desarrollo de la APV en la Comunidad de Madrid, pero su implantación efectiva depende de una articulación política energética, agraria y de ordenación del territorio, que avanza y se encuentra en construcción, es decir, debe ir más allá de un análisis regional.

BIBLIOGRAFÍA

Aroca-Delgado, R., Pérez-Alonso, J., Callejón-Ferre, Á. J., & Díaz-Pérez, M. (2018). Morphology, yield and quality of greenhouse tomato cultivation with flexible photovoltaic rooftop panels (Almería-Spain). *Scientia Horticulturae, 241*, 193–202. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.071

Bern University of Applied Sciences. (2023). *More fruit, more energy: Agrivoltaics is paying off*. https://www.bfh.ch/en/news/stories/more-fruit-more-energy/

Brent, A. C., Chapman, N., & de Kock, I. H. (2024). Agrivoltaic systems: Potential opportunities for South Africa. A GIS analysis. *AgriVoltaics Conference Proceedings, 2*(2023). https://doi.org/10.52825/agripv.v2i.982

Centro Nacional de Información Geográfica. (s. f.-a). *Base topográfica nacional 1:100.000 (BTN100)* [Conjunto de datos vectoriales]. Instituto Geográfico Nacional. https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/btn100

Centro Nacional de Información Geográfica. (s. f.-b). *Límites municipales, provinciales y autonómicos* [Conjunto de datos vectoriales]. Instituto Geográfico Nacional. https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/limites-municipales-provinciales-autonomicos

Centro Nacional de Información Geográfica. (s. f.-c). *Redes de transporte* [Conjunto de datos vectoriales]. Instituto Geográfico Nacional. https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/redes-transporte

Colak, H. E., Memisoglu, T., & Gercek, Y. (2020). Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy, 149*, 565–576. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.078

Comunidad de Madrid. (2022). *Instrucción de 14 de noviembre de 2022, de la Dirección General de Urbanismo, sobre la tramitación de instalaciones generadoras de energía eléctrica y de autoconsumo en suelo no urbanizable*. https://www.comunidad.madrid/transparencia/sites/default/files/regulation/documents/2022-11_instruccion_sobre_instalaciones_generadoras_y_autoconsumo.pdf

Comunidad de Madrid. (2024a). *Clases agrológicas de la Comunidad de Madrid* [Conjunto de datos espaciales]. Infraestructura de Datos Espaciales de la Comunidad de Madrid (IDEM). https://idem.comunidad.madrid/catalogocartografia/srv/spa/catalog.search#/metadata/spacm_clasesagro

Comunidad de Madrid. (2024b). *Guía metodológica para la implantación de energías renovables: Índice de Capacidad de Acogida*. Consejería de Medio Ambiente, Agricultura e Interior. https://www.comunidad.madrid/servicios/urbanismo-medio-ambiente/evaluacion-ambiental-estrategica#potenciales-zonas-implantacion-renovables

Comunidad de Madrid. (2025, 11 de septiembre). Díaz Ayuso anuncia un Plan de Protección del Paisaje que delimitará los espacios para instalar plantas fotovoltaicas y proteger la agricultura. *Notas de Prensa de la Comunidad de Madrid*. https://www.comunidad.madrid/noticias/2025/09/11/diaz-ayuso-anuncia-plan-proteccion-paisaje-delimitara-espacios-instalar-plantas-fotovoltaicas-proteger-agricultura

Comunidad de Madrid. (2026a, 23 de marzo). La Comunidad de Madrid solicita al Gobierno central auditar de manera independiente las autorizaciones ambientales

de macroplantas fotovoltaicas. *Notas de Prensa de la Comunidad de Madrid*. https://www.comunidad.madrid/noticias/2026/03/23/comunidad-madrid-solicita-gobierno-central-auditar-manera-independiente-autorizaciones-ambientales-macroplantas-fotovoltaicas

Comunidad de Madrid. (2026b). *SIGPAC: Sistema de Identificación de Parcelas Agrícolas* [Conjunto de datos espaciales]. Consejería de Agricultura, Ganadería y Medio Rural. https://www.comunidad.madrid/agricultura-ganaderia-medio-rural/sigpac

Comunidad de Madrid. (s. f.-a). *Evaluación ambiental estratégica: Potenciales zonas de implantación de renovables*. Recuperado el 22 de febrero de 2026, de https://www.comunidad.madrid/servicios/urbanismo-medio-ambiente/evaluacion-ambiental-estrategica#potenciales-zonas-implantacion-renovables

Comunidad de Madrid. (s. f.-b). *Red Natura 2000 (Zonas de Especial Conservación y Zonas de Especial Protección para las Aves)* [Conjunto de datos espaciales]. Infraestructura de Datos Espaciales de la Comunidad de Madrid (IDEM). https://idem.comunidad.madrid/catalogocartografia/srv/spa/catalog.search#/metadata/spacm_rednaturapg

Dere, S., Günay, E. E., & Kula, U. (2023). Investigation of the potentials of the agrivoltaic systems in Turkey. *12th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems (IMSS'23)*, Sakarya, Turquía. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6062-0_49

Dirección General de Urbanismo. (2016). *Usos del suelo urbano y urbanizable ocupado de la Comunidad de Madrid 2016* (spacm_elusvacsocu) [Conjunto de datos

vectoriales]. Infraestructura de Datos Espaciales de la Comunidad de Madrid (IDEM). https://idem.comunidad.madrid/catalogocartografia/srv/spa/catalog.search#/metadata/spacm_elusvacsocu

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

El Periódico de la Energía. (2025, 12 de marzo). Las emisiones de CO2 de la energía crecieron un 0,8 % en 2024 hasta un nuevo récord anual. https://elperiodicodelaenergia.com/las-emisiones-de-co2-de-la-energia-crecieron-un-0-8-en-2024-hasta-un-nuevo-record-anual/

Endesa. (2026). *150 hectáreas fotovoltaicas en Totana: Un oasis en el sureste ibérico*. https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/pedro-quinonero-bosqueo2-150-hectareas-fotovoltaicas-totana-oasis-sureste-iberico

Esri. (2023). *What is GIS?* Environmental Systems Research Institute. https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview

Ezzaeri, K., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Gourdo, L., Bazgaou, A., Wifaya, A., Demrati, H., Bekkaoui, A., Aharoune, A., Poncet, C., & Bouirden, L. (2018). The effect of photovoltaic panels on the microclimate and on the tomato production under photovoltaic canarian greenhouses. *Solar Energy, 173*, 1126–1134. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.043

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). (2021). *Agrivoltaics: Opportunities for agriculture and the energy transition. A guideline for Germany*.

https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/agrivoltaics-opportunities-for-agriculture-and-the-energy-transition.html

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). (2023). *Agrivoltaics: Opportunities for agriculture and the energy transition. A guideline for Germany*. https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/agrivoltaics-opportunities-for-agriculture-and-the-energy-transition.html

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). (2026, 14 de julio). *Photovoltaics report*. https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html

Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy, 1*(1), 55–69. https://doi.org/10.1080/01425918208909875

Iberdrola. (2024). *Iberdrola España construirá la primera agrovoltaica para potenciar el cultivo de manzanas de País Vasco*. https://www.iberdrolaespana.com/sala-comunicacion/noticias/primera-agrovoltaica-pais-vasco-wine-solar

IEA-PVPS. (2025). *Status of PV module recycling in IEA PVPS Task 12 countries*. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/07/IEA-PVPS-T12-31-2025-REPORT-Status-Module-Recycling.pdf

Insolight. (2025a, 19 de septiembre). *Insolight, in collaboration with Agroscope, Romande Energie, and the canton of Valais, inaugurates its first agrivoltaic orchard installation in Conthey, Switzerland* [Comunicado de prensa]. 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/

Insolight. (2025b, 19 de septiembre). *World premiere: Insolagrin Conthey, the new agrivoltaic solution is now operational* [Comunicado de prensa]. https://insolight.ch/press/world-premiere-insolagrin-conthey-the-new-agrivoltaic-solution-is-now-operational/

Insolight. (2026a). *Agri-PV solutions for orchards*. https://insolight.ch/agripv-solutions-for-orchards/

Insolight. (2026b). *Agrivoltaic projects: AgriPV installations*. https://insolight.ch/projects/

Insolight. (2026c). *Agrivoltaic solutions for professional growers*. https://insolight.ch/solutions/

Intecsa Renovables S.L. (2022). *AGRITRACK: Tecnología agrovoltaica y sistemas de seguimiento solar*. https://www.intecsasolar.com/agritracker

Intecsa Solar. (2026). *Agritracker: The ultimate solution for agrivoltaics*. https://www.intecsasolar.com/agritracker

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. https://www.ipcc.ch/srccl/

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth*

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

International Energy Agency (IEA). (2025). *Global energy review 2025: CO2 emissions*. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). *Innovation landscape for a renewable-powered future: Agrivoltaics*. https://www.irena.org/publications/2019/Feb/Innovation-landscape-for-a-renewable-powered-future

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025). *Renewable power generation costs in 2024*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf

Kujawa, A., Kornas, J., Hanrieder, N., González Rodríguez, S., Hristov, L., Fernández Solas, Á., Wilbert, S., Blanco, M. J., Berzosa Álvarez, L., Martínez Gallardo, A., Amate González, A., Casas Fernández, M., Palmero Luque, F. J., López Godoy, M., Alonso-García, M. C., Carballo, J. A., Zarzalejo Tirado, L. F., Cornaro, C., & Pitz-Paal, R. (2024). Tomato yield under different shading levels in an agrivoltaic greenhouse in Southern Spain. *Agronomy, 14*(4), Artículo 674. https://doi.org/10.3390/agronomy14040674

Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. Boletín Oficial del Estado, núm. 121, de 21 de mayo de 2021. https://www.boe.es/boe/dias/2021/05/21/pdfs/BOE-A-2021-8447.pdf

Ley 9/2001, de 17 de julio, del Suelo, de la Comunidad de Madrid. Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid, núm. 177, de 27 de julio de 2001. https://www.boe.es/buscar/pdf/2001/BOE-A-2001-18984-consolidado.pdf

Liu, Y. et al. (2024). Agrivoltaic systems: A review on synergistic mechanisms, technological evolution, and future perspectives. *Carbon Energy*. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cey2.650

López Luque, R., & Ramírez Faz, J. C. (2023). Consideraciones para la implantación del modelo agrivoltaico. *Mediterráneo Económico*, (39), 129–153. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10374183

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2024). *Análisis de la implantación de parques fotovoltaicos en terrenos agrarios en España* (Agrinfo n.º 37). Serie Análisis y Prospectiva. https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/ministerio/servicios/servicios-de-informacion/analisis-y-prospectiva/ayp-serie-agrinfo/ayp_37_parquefotovoltaico.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2023). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030*. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/es/energia/estrategia-normativa/pniec-23-30.html

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2025a). *Calculadora de proyectos de absorción de CO2 – Hoja 4: Factores de emisión*. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/calculadoras.html

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2025b). *Extracto de la Resolución del 18 de diciembre de 2025, del Consejo de Administración de E.P.E. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), M.P., por la que se realiza la segunda convocatoria del programa de incentivos de proyectos innovadores de energías renovables y almacenamiento, así como a la implantación de sistemas térmicos renovables (energías renovables innovadoras) en el marco del PRTR-NextGenerationEU. Programa 1: Proyectos innovadores de instalaciones agrivoltaicas*. Boletín Oficial del Estado, núm. 306, de 23 de diciembre de 2025. https://www.boe.es/boe/dias/2025/12/23/pdfs/BOE-B-2025-47490.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (s. f.). *Red Natura 2000. Espacios protegidos*. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/red-natura-2000.html

Moreda-Cantero, G. P., Juana-Sirgado, L., Sánchez-Calvo, R., Rodríguez Lucas, D., & Muñoz-García, M. Á. (2025). Integración de paneles fotovoltaicos dispuestos verticalmente con cultivos de secano en la Península Ibérica [Comunicación]. *XIII Congreso Ibérico de Agroingeniería*, Coímbra, Portugal. https://agroing2025.org/images/atas/Livro%20de%20Atas%20-%20Congresso%20Ib_rico%20de%20Agroengenharia%20-%202025_v5.pdf

Naciones Unidas. (2026, 12 de marzo). La agrivoltaica: Una solución brillante para el hambre y el cambio climático. *Noticias ONU*. https://news.un.org/es/story/2026/03/1541265

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2024). *Carbon dioxide: Vital signs of the planet*. NASA Science: Earth Indicators. https://science.nasa.gov/earth/explore/earth-indicators/carbon-dioxide/

Noorollahi, E., Fadai, D., Akbarpour Shirazi, M., & Ghodsipour, S. (2016). Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP): A case study of Iran. *Energies, 9*(8), Artículo 643. https://doi.org/10.3390/en9080643

Onyx Solar. (s. f.). *Invernadero fotovoltaico: Integración de vidrio fotovoltaico en estructuras agrícolas*. Recuperado el 23 de abril de 2026, de https://onyxsolar.es/photovoltaic-greenhouse

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2012). *Directiva 2012/19/UE sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*. Diario Oficial de la Unión Europea.

Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea. (2023). *Directiva (UE) 2023/2413, por la que se modifica la Directiva (UE) 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*. Diario Oficial de la Unión Europea. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex:32023L2413

Pelczar, S. (2025). *Is the land equivalent ratio (LER) a sufficient indicator to describe the efficiency of agrivoltaic system? Insights to better understanding the interpretation of LER and the development of additional coefficients* [Preprint]. SSRN. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5185197

Pignataro, G., Chatzipanagi, A., & Taylor, N. (2021). Opportunities and challenges of agrivoltaics in the European Union. *Sustainability, 13*(12), Artículo 6871. https://doi.org/10.3390/su13126871

Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. (2015). *Boletín Oficial del Estado*, 45.

Real Decreto-ley 7/2026, de 20 de marzo, por el que se aprueba el Plan Integral de Respuesta a la Crisis en Oriente Medio. Boletín Oficial del Estado, núm. 71, de 21 de marzo de 2026. https://www.boe.es/boe/dias/2026/03/21/pdfs/BOE-A-2026-6544.pdf

Red Eléctrica de España (REE). (2026). *Potencia instalada: Solar fotovoltaica*. Informe de Energías Renovables. https://www.sistemaelectrico-ree.es/es/informe-de-energias-renovables/sol/potencia-instalada/solar-fotovoltaica-sol-potencia

Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Braun, C., Weselek, A., Bauer, A., Högy, P., Goetzberger, A., & Weber, E. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy, 265*, Artículo 114737. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737

Solargis. (2023). *Global Solar Atlas 2.0* [Base de datos de radiación solar]. Grupo Banco Mundial. https://globalsolaratlas.info

Soltec. (s. f.). *Soluciones agrovoltaicas: Tecnología para la coexistencia de energía y agricultura*. Recuperado el 23 de abril de 2026, de https://soltec.com/es/soluciones/productos/agrovoltaica/

Tajima, K., & Iida, T. (2021). *Evolution of agrivoltaic farms in Japan* [Preprint]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/352803816_Evolution_of_agrivoltaic_farms_in_Japan

UNHCR. (2024). *No escape II: The way forward*. https://www.unhcr.org/media/no-escape-ii-way-forward

Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28*, 11–17. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042

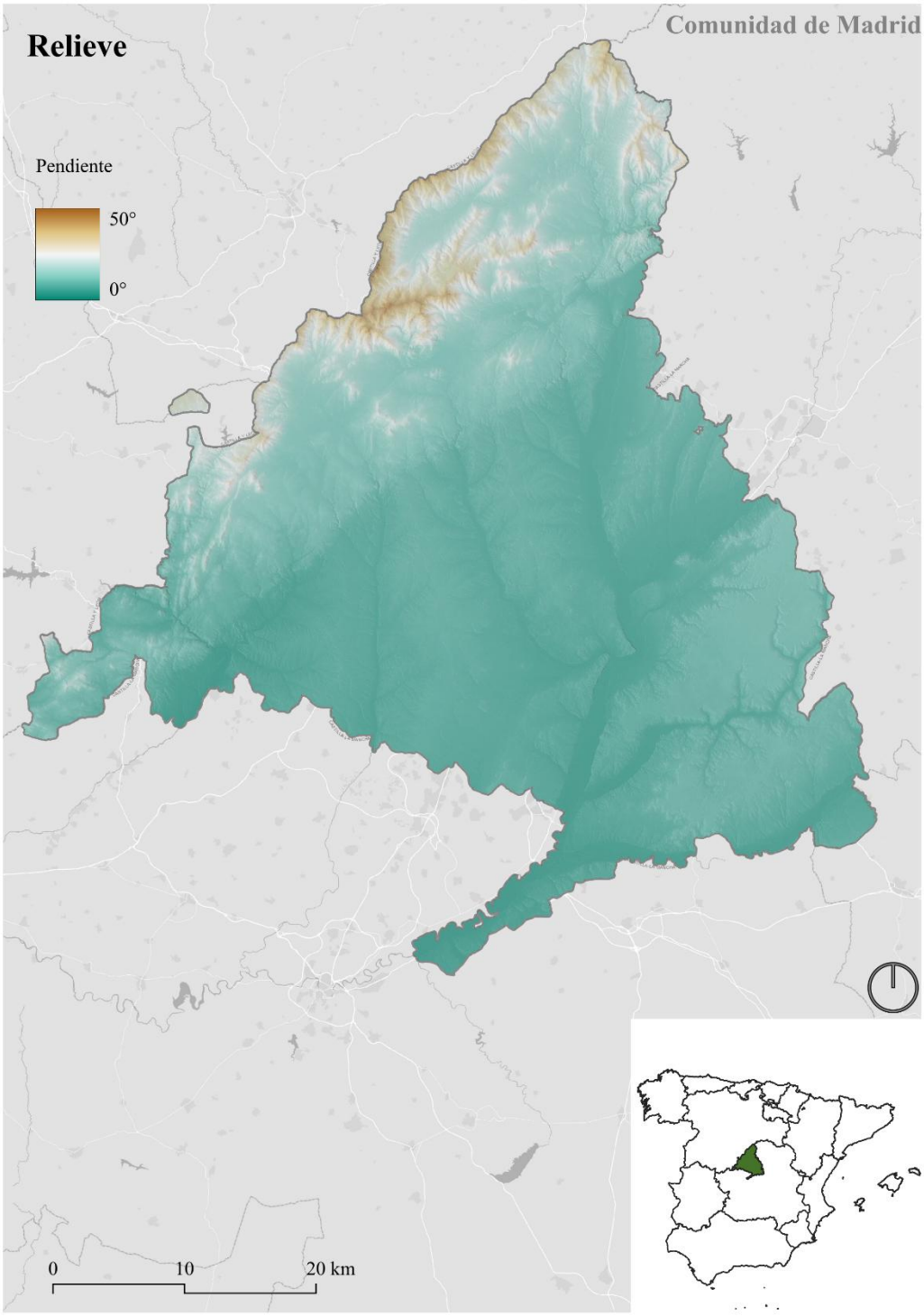
Vitale, S., Lebeau, F., & Leloux, J. (2026). A GIS-based method for assessing the potential agronomic impact of agrivoltaics in grassland. *AgriVoltaics Conference Proceedings, 4*(2025). https://doi.org/10.52825/agripv.v4i.2853

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13593-019-0581-3.pdf

Zahrawi, A. A., & Aly, M. A. (2024). A review of agrivoltaic systems: Addressing challenges and enhancing sustainability. *Sustainability, 16*(18), Artículo 8271. https://doi.org/10.3390/su16188271

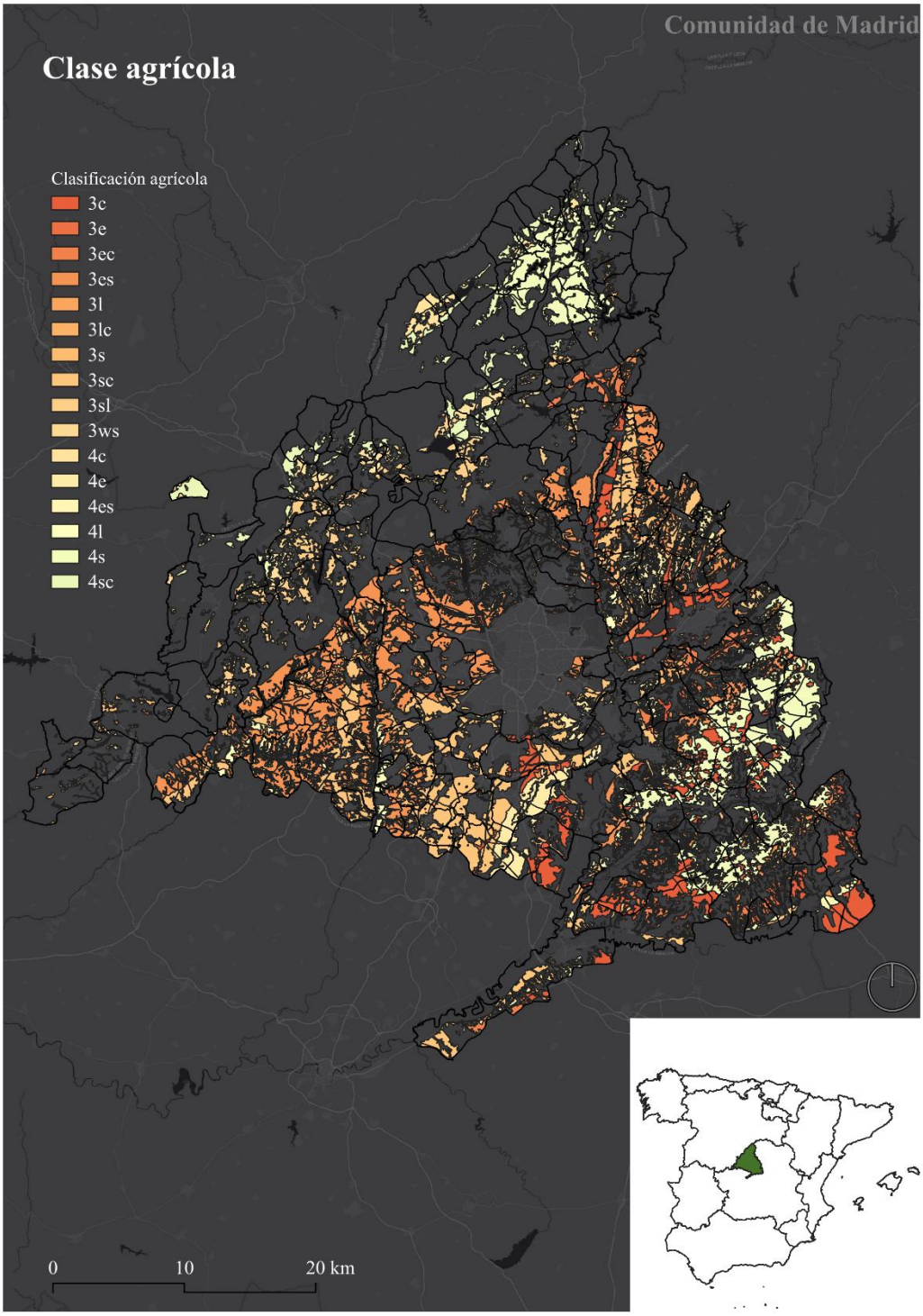
ANEXOS

Anexo 1. Relieve Comunidad de Madrid, Pendiente (°)



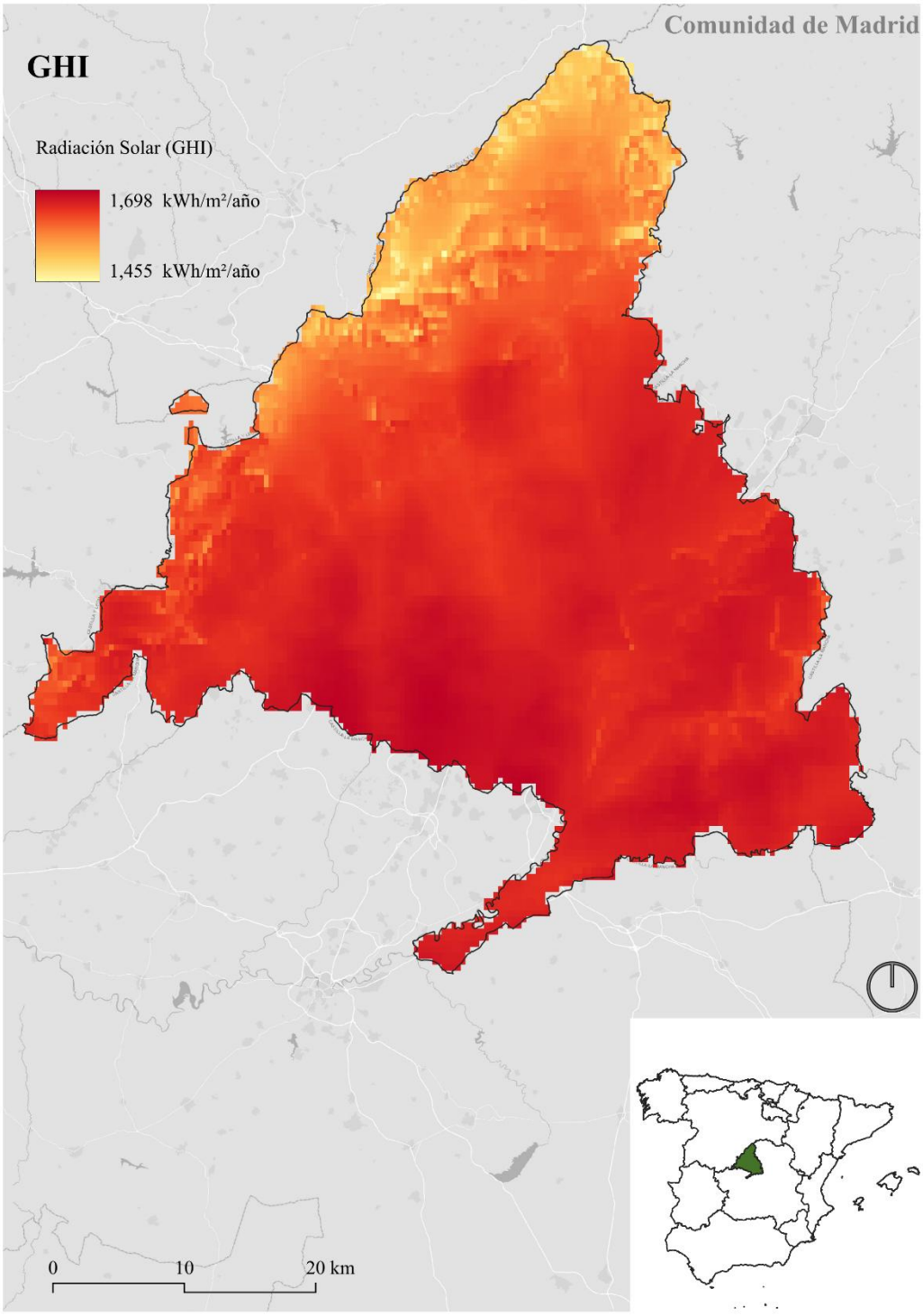
Elaboración Propia

Anexo 2. Clasificación agrícola Comunidad de Madrid



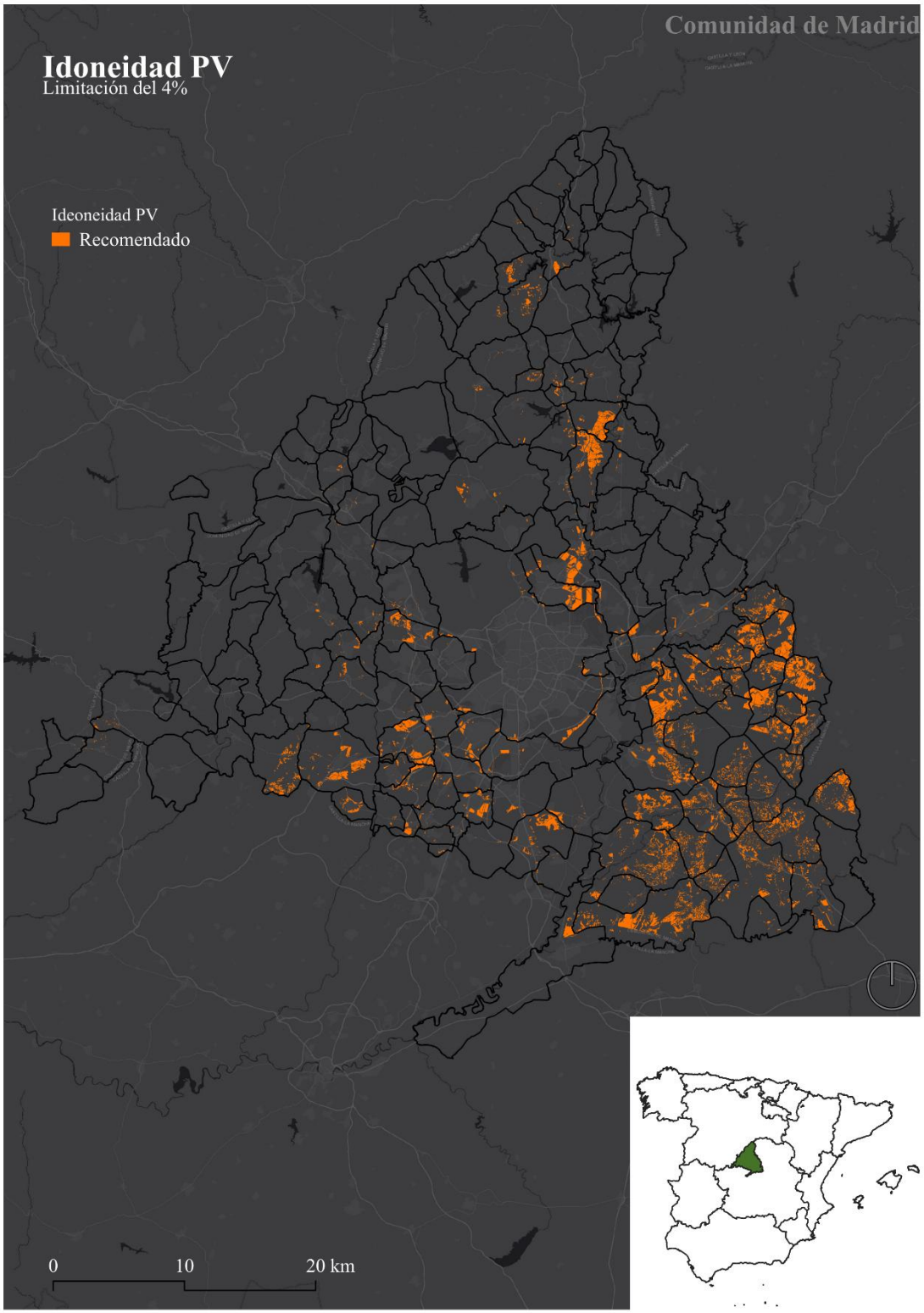
Elaboración Propia

Anexo 3. Radiación Solar Anual en la Comunidad de Madrid



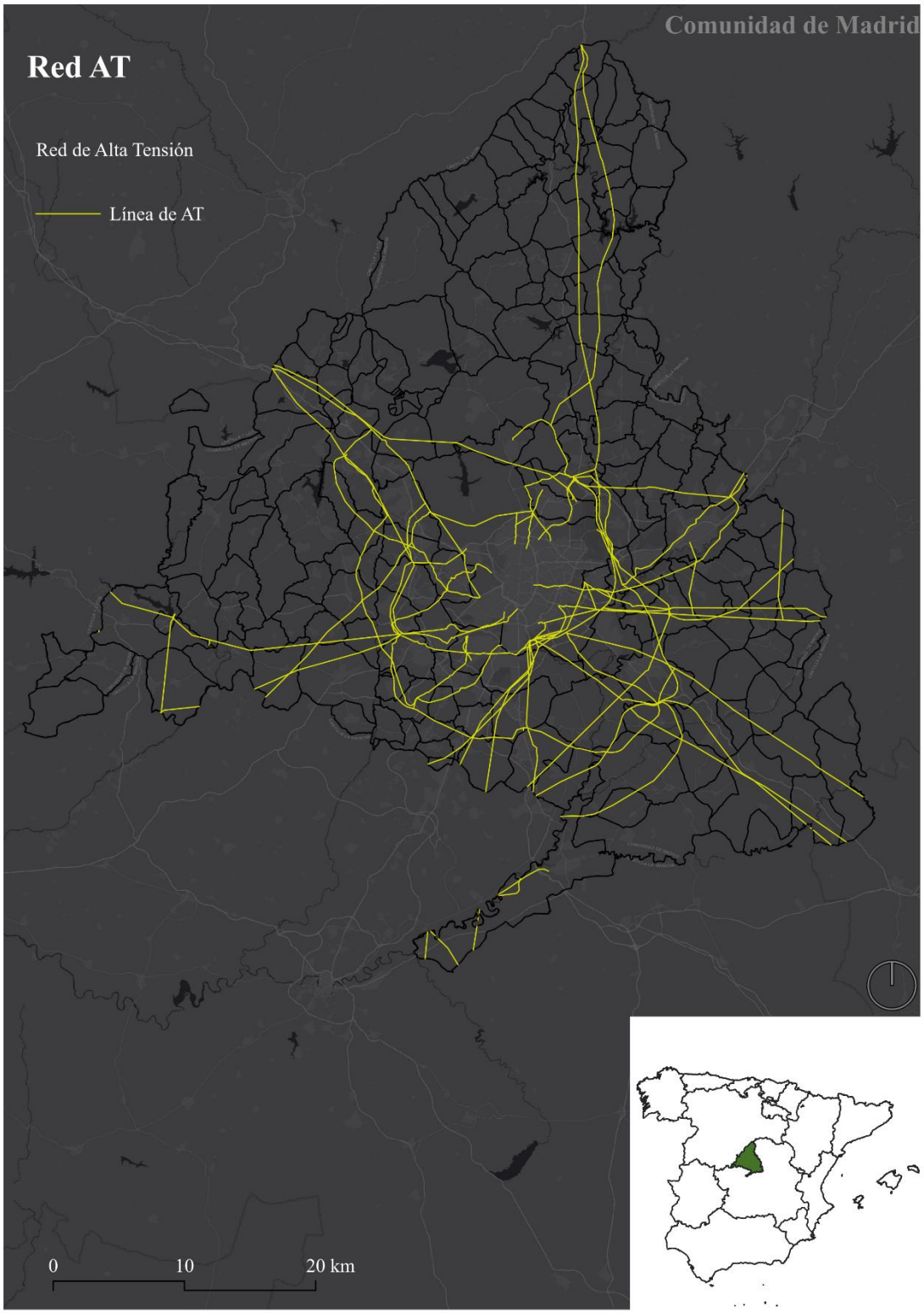
Elaboración Propia

Anexo 4. Idoneidad PV en la Comunidad de Madrid, limitación del 4%



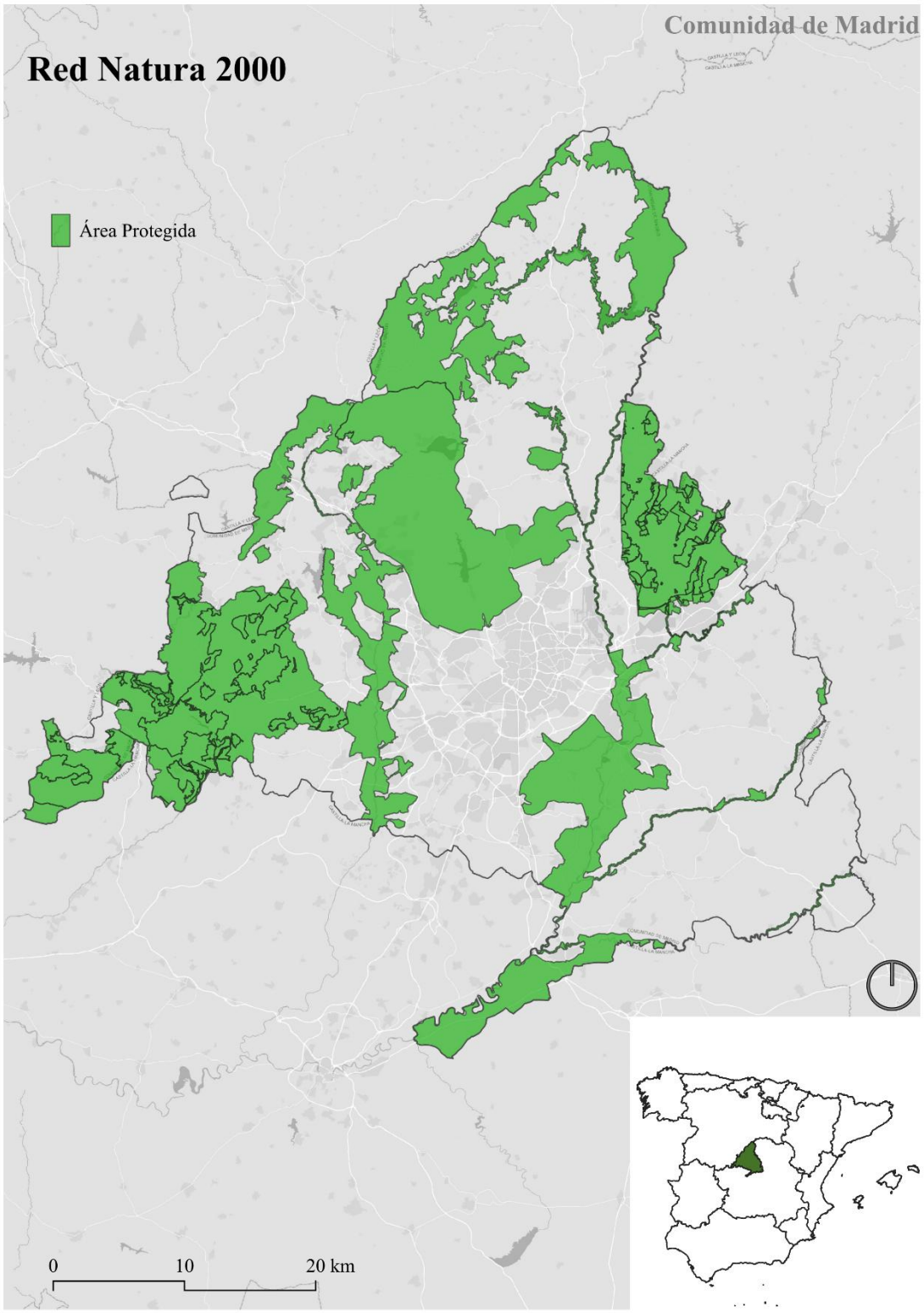
Elaboración Propia

Anexo 5. Red de Alta Tensión de la Comunidad de Madrid



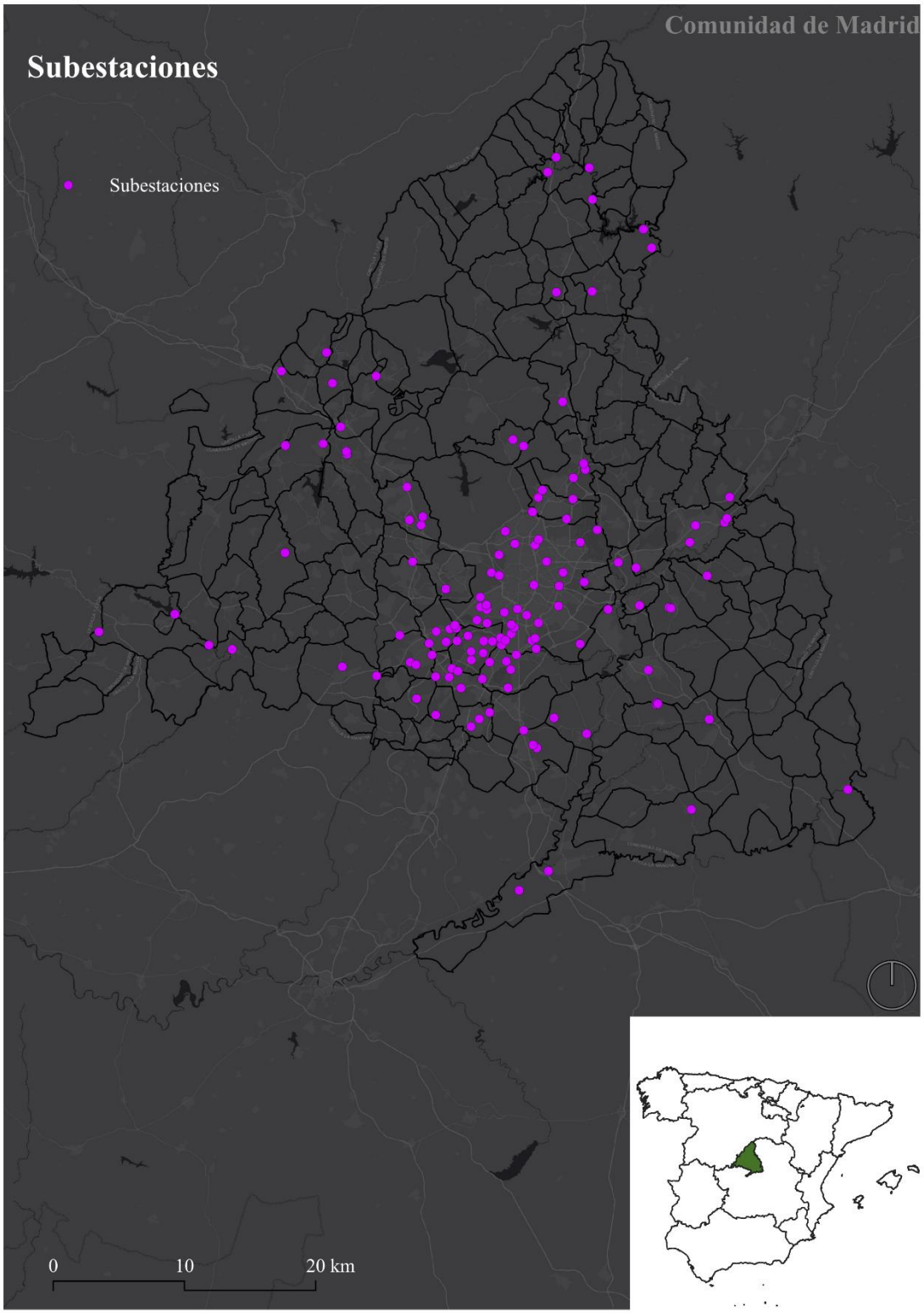
Elaboración Propia

Anexo 6. Red Natura 2000 en la Comunidad de Madrid



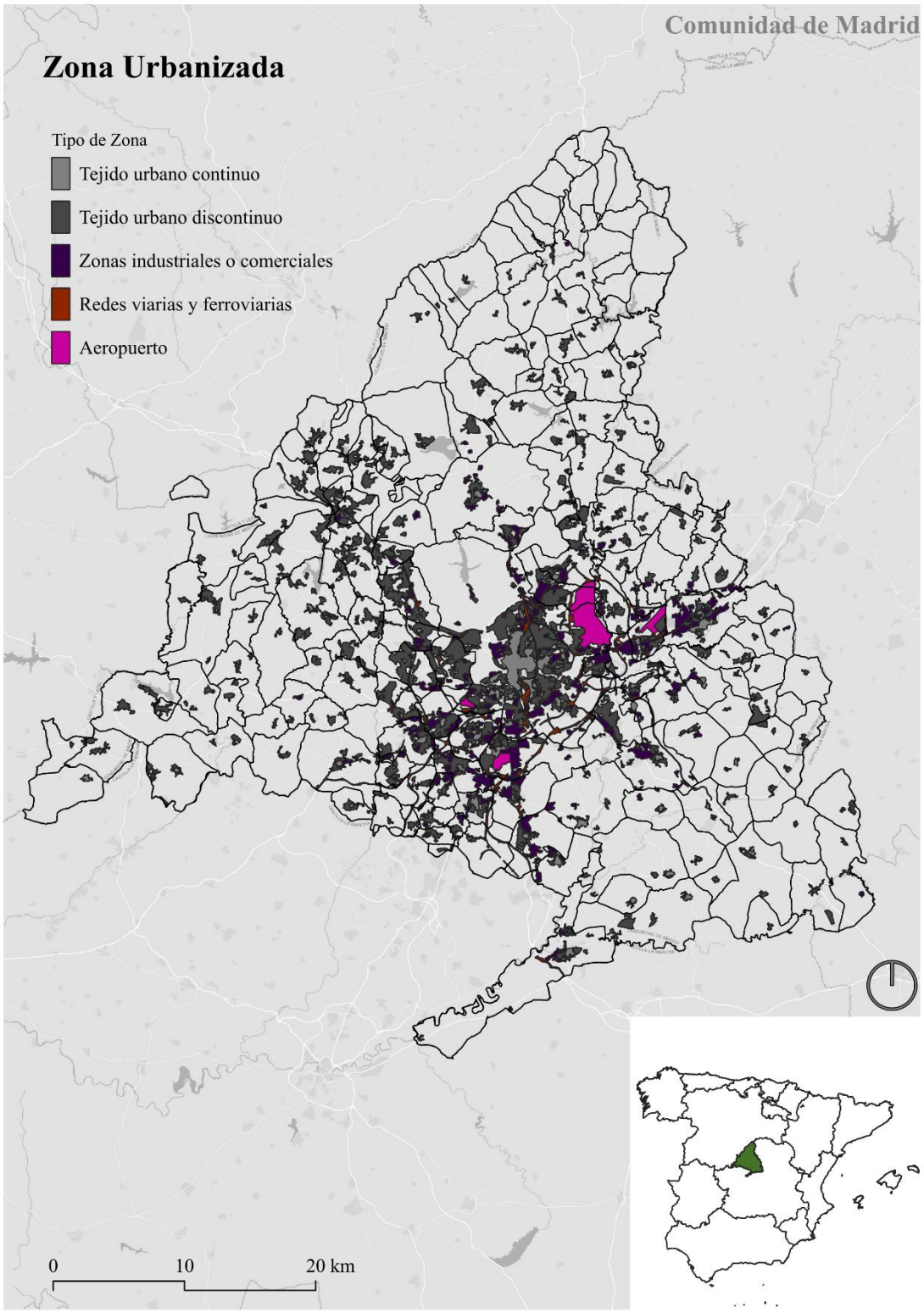
Elaboración Propia

Anexo 7. Subestaciones en la Comunidad de Madrid



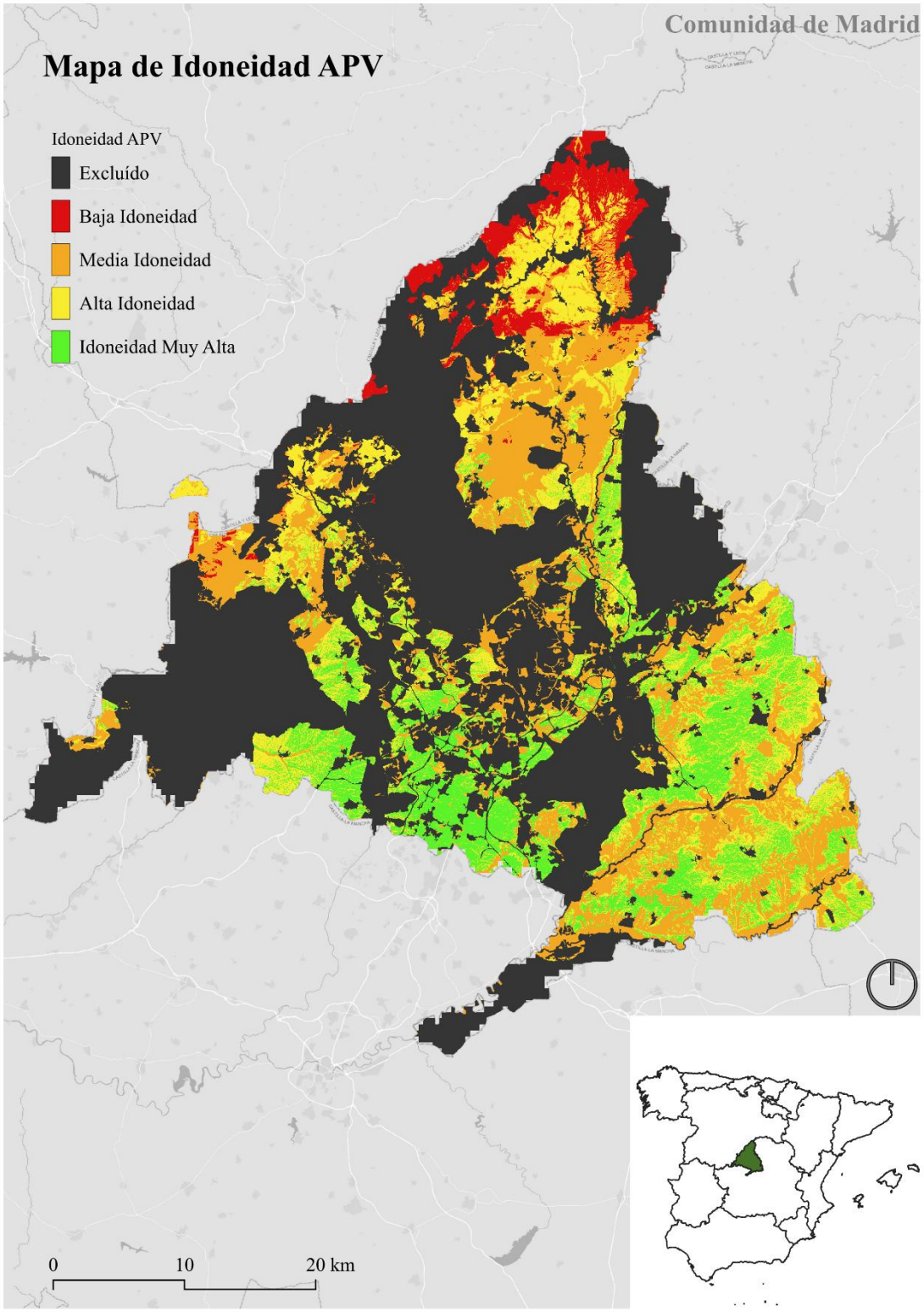
Elaboración Propia

Anexo 8. Zona Urbanizada de la Comunidad de Madrid



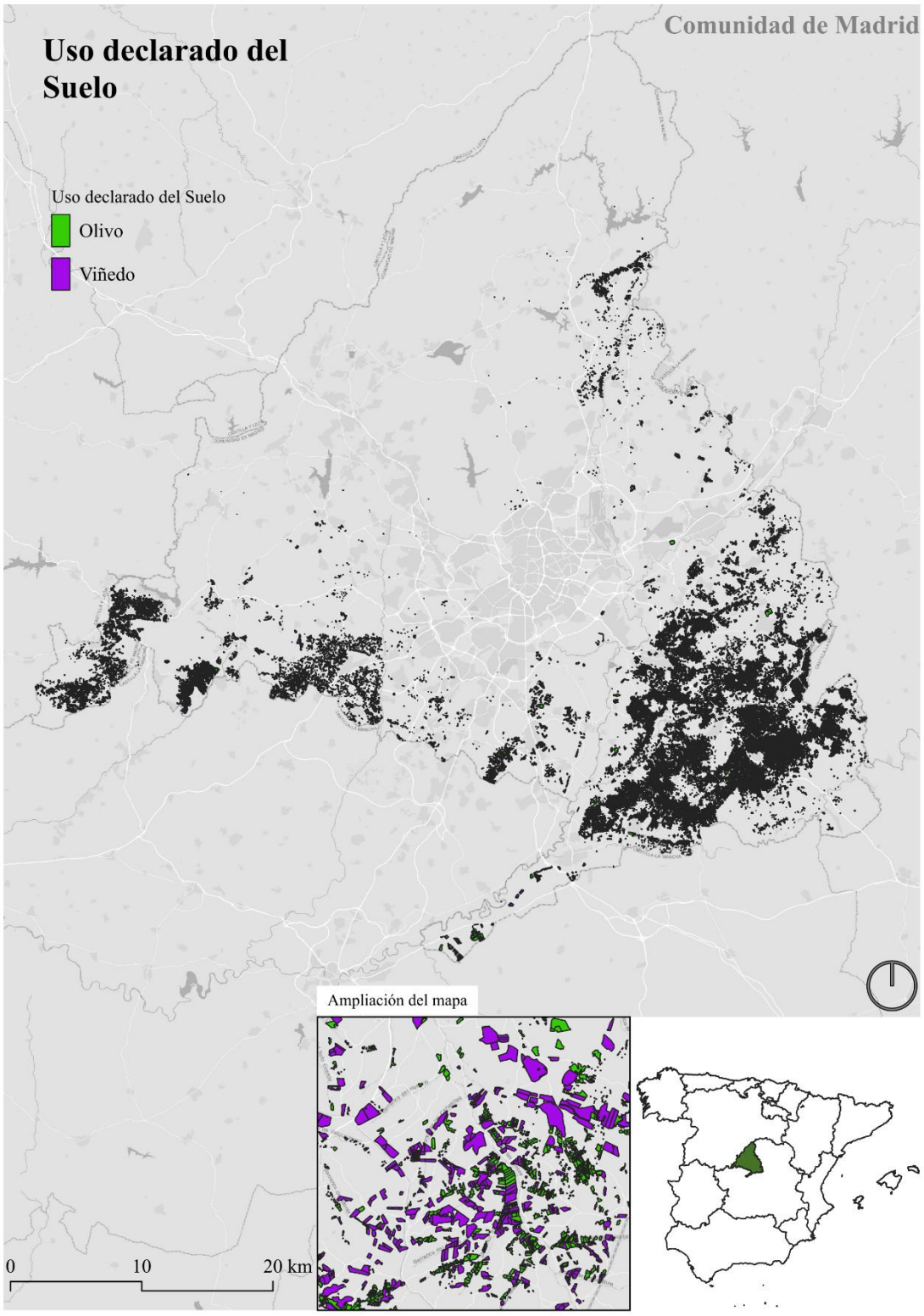
Elaboración Propia

Anexo 9. Mapa de Idoneidad APV de la Comunidad de Madrid



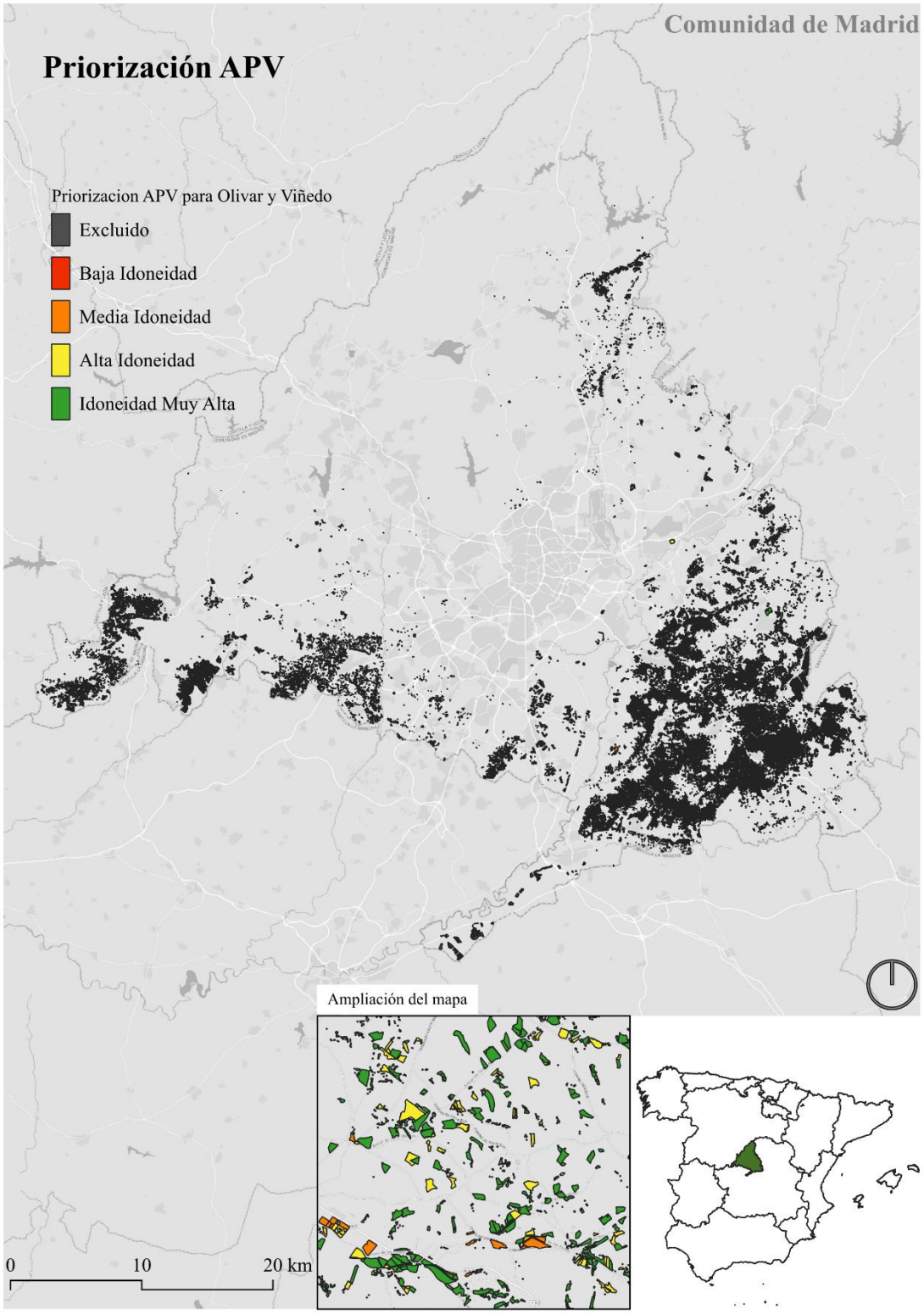
Elaboración Propia

Anexo 10. Uso declarado del Suelo en la Comunidad de Madrid



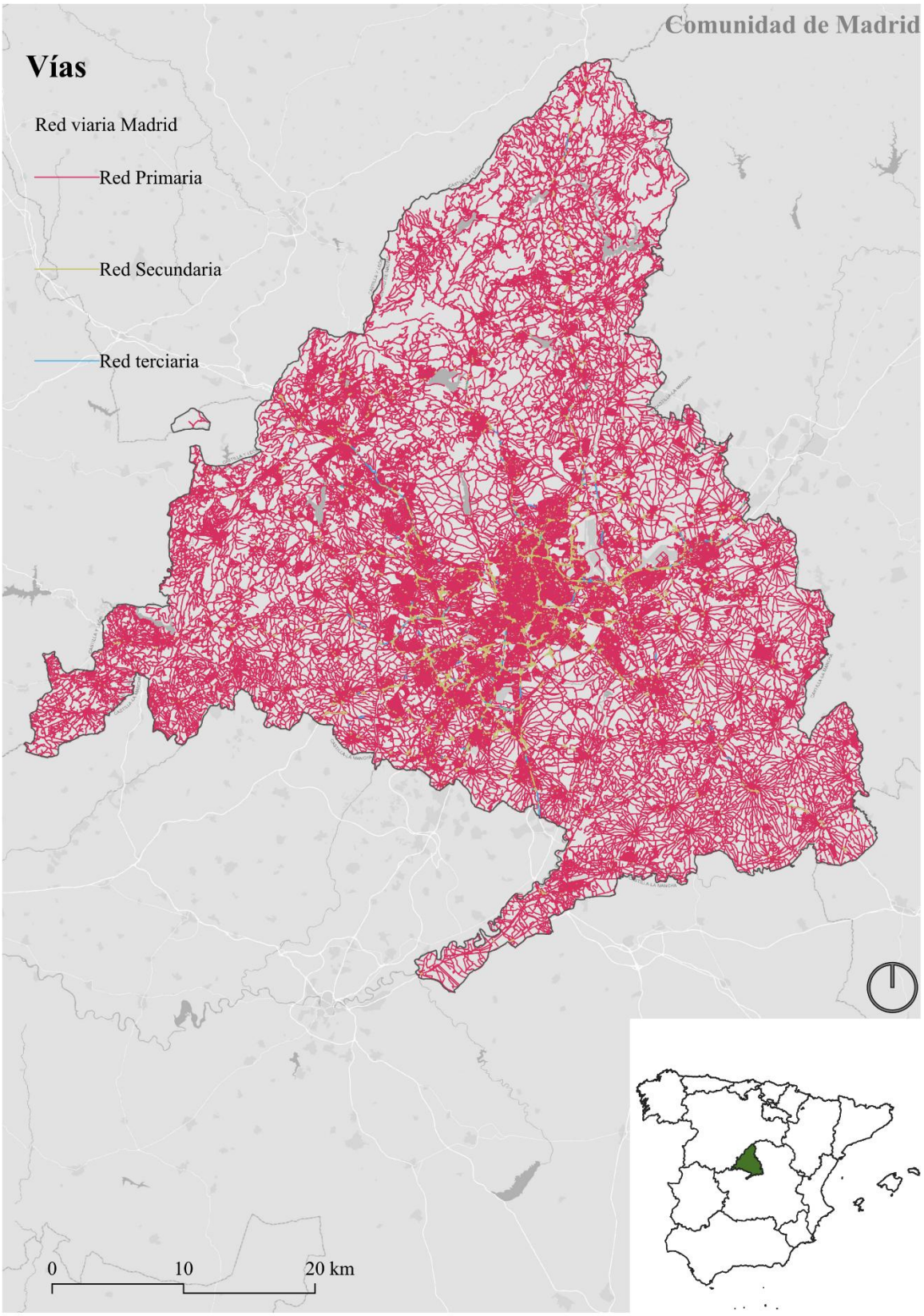
Elaboración Propia

Anexo 11. Mapa de Priorización APV para Olivos y Viñedos



Elaboración Propia

Anexo 12. Red viaria Madrid



Anexo 13. Superficie total por municipios de la limitación del 4%

Tabla 22. Superficie total por municipios de la limitación del 4%

Municipio	**Area Limitacion 4% (ha)**
Villarejo de Salvanés	6380,9
Colmenar de Oreja	6031,99
Navalcarnero	5197,38
Chinchón	5160,51
Fuentidueña de Tajo	3830,06
Villamanta	3483,34
El Molar	3358,41
Valdaracete	3338,31
Brea de Tajo	3124,03
Campo Real	3101,36
Estremera	2955,38
Santa María de la Alameda	2906,25
Valdemoro	2630,98
Garganta de los Montes	2578,52
Perales de Tajuña	2497,66
Pezuela de las Torres	2384,92
Los Santos de la Humosa	2358,03
Loeches	2328,17
Colmenar Viejo	2313,7
Brunete	2186,39
El Vellón	2151,84
Valdelaguna	2037,96
Valdilecha	2023,9
Paracuellos de Jarama	1977,49
Arganda del Rey	1884,76
Carabaña	1849,9
Puentes Viejas	1809,47
Móstoles	1721,29
Fuente el Saz de Jarama	1663,91
San Sebastián de los Reyes	1614,85
Torrejón de Velasco	1558,94
Villalbilla	1551,19
Corpa	1504,74
Morata de Tajuña	1435,19
Torres de la Alameda	1434,25
Guadalix de la Sierra	1353,87
Moraleja de Enmedio	1347,53
Alcorcón	1337,02
Valdemorillo	1313,73
Olmeda de las Fuentes	1301,82
Patones	1296,4
Algete	1290,84
Anchuelo	1276,09

Villaconejos	1238,51
Zarzalejo	1229,79
Tielmes	1214,77
Santorcaz	1201,11
Horcajuelo de la Sierra	1197,69
Quijorna	1197,03
Villar del Olmo	1177,53
Alcobendas	1154,03
San Agustín del Guadalix	1111,96
Parla	1090,57
Pozuelo del Rey	1062,8
Belmonte de Tajo	1043,6
Cobeña	1033,8
Majadahonda	991,93
Villamanrique de Tajo	991,38
Getafe	973,72
Berzosa del Lozoya	972,19
Orusco de Tajuña	964,67
Prádena del Rincón	952,25
Madrid	927,67
Fuenlabrada	914,93
Humanes de Madrid	911,73
Nuevo Baztán	906,02
Miraflores de la Sierra	900,99
Valdetorres de Jarama	864,86
Gargantilla del Lozoya y Pinilla de Buitrago	853,04
Pinto	829,41
La Acebeda	787,38
Tres Cantos	774,87
Ambite	744,74
Villanueva de la Cañada	724,48
El Escorial	702,42
Leganés	693,36
Villanueva del Pardillo	683,46
Ajalvir	659,13
Serranillos del Valle	641,49
Valverde de Alcalá	634,26
Canencia	619,33
Galapagar	614,86
Soto del Real	612,95
Bustarviejo	607,24
Robledillo de la Jara	584,89
Pedrezuela	582,61
Talamanca de Jarama	582,41
Torrelaguna	551,25
San Fernando de Henares	549,16

Navalafuente	546,93
Torrejón de Ardoz	537,83
Cubas de la Sagra	536,19
Aranjuez	531,07
Griñón	518,66
El Álamo	508,39
San Martín de Valdeiglesias	499,25
Cabanillas de la Sierra	485,48
Villaviciosa de Odón	474,6
Cadalso de los Vidrios	452,81
Alcalá de Henares	420,47
Venturada	412,88
Colmenarejo	407,71
Las Rozas de Madrid	405,28
Buitrago del Lozoya	402,95
Piñuécar-Gandullas	378,25
Pozuelo de Alarcón	341,36
Navarredonda y San Mamés	324,36
Redueña	318,06
Ciempozuelos	304,26
San Martín de la Vega	284,13
Batres	278,83
Collado Mediano	258,87
Boadilla del Monte	255,75
Torremocha de Jarama	255,31
El Berrueco	237,38
Mejorada del Campo	210,92
Arroyomolinos	208,49
Villavieja del Lozoya	203,84
Braojos	200,89
Meco	198,57
Casarrubuelos	180,35
Collado Villalba	148,62
Madarcos	136,38
Alpedrete	133,23
Torrejón de la Calzada	122,18
Coslada	116,31
Rozas de Puerto Real	89,71
Montejo de la Sierra	81,89
Rivas-Vaciamadrid	64,42
Gascones	63,58
Titulcia	51,83
La Serna del Monte	35,93
Moralzarzal	19,03
Lozoyuela-Navas-Sieteiglesias	15,14
Torrelodones	12,71

Guadarrama	5,38
Cervera de Buitrago	4,84
Valdemaqueda	4,33
Valdepiélagos	3,49
Valdemanco	3,45
Almoguera	2,23
Sevilla la Nueva	2,14
Robledo de Chavela	2,14
Ribatejada	2,05
Azuqueca de Henares	1,88
Peguerinos	1,6
Casarrubios del Monte	0,85
La Hiruela	0,84
Navalagamella	0,78
Valmojado	0,76
El Casar	0,75
Horcajo de la Sierra-Aoslos	0,75
Las Navas del Marqués	0,64
Velilla de San Antonio	0,53
Mondéjar	0,53
Villanueva de Perales	0,42
El Tiemblo	0,4
Santa Cruz de la Zarza	0,38
Almorox	0,36
Puebla de la Sierra	0,34
Méntrida	0,33
Ugena	0,3
Illescas	0,3
Galápagos	0,29
Villarrubia de Santiago	0,28
Pioz	0,26
Seseña	0,22
Torrejón del Rey	0,22
Navahondilla	0,2
Villa del Prado	0,2
Fuentenovilla	0,19
El Atazar	0,18
El Espinar	0,18
Barajas de Melo	0,17
Esquivias	0,17
Lozoya	0,17
Carranque	0,13
Yeles	0,12
Pozo de Guadalajara	0,11
Chiloeches	0,08
San Bartolomé de Pinares	0,08

Aldea del Fresno	0,06
Valdepeñas de la Sierra	0,06
Santa Cruz del Retamar	0,06
Uceda	0,05
Manzanares el Real	0,04
Ontígola	0,04
El Cardoso de la Sierra	0,03
Villanueva de la Torre	0,03
Torrecaballeros	0,03
Belinchón	0,03
Loranca de Tajuña	0,02
Zarza de Tajo	0,02
Almonacid de Toledo	0,02
El Hoyo de Pinares	0,02
Rascafría	0,01
Villamantilla	0,01
Toledo	0,01
Total	**157859,2**

Anexo 14. Tabla de Idoneidad por Municipio de la Comunidad de Madrid

Tabla 23. Idoneidad por Municipio de la Comunidad de Madrid

Municipio	Excluido (ha)	Baja Idoneidad (ha)	Media Idoneidad (ha)	Alta Idoneidad (ha)	Idoneidad Muy Alta (ha)	Total (ha)
Madrid	78124.1	0.0	18848.9	9258.8	9211.7	115443.5
Navalcarnero	5401.2	0.0	359.2	2487.6	6083.5	14331.5
Villarejo de Salvanés	594.2	0.0	8755.0	6504.9	5877.5	21731.6
Campo Real	624.1	0.0	1715.1	3148.9	5608.3	11096.4
Colmenar de Oreja	3861.0	0.0	9000.0	2964.3	5470.5	21295.8
Torrejón de Velasco	465.6	0.0	477.9	689.3	4383.4	6016.1
Chinchón	4821.8	0.0	9410.8	3885.3	4030.0	22148.0
Valdemoro	4131.5	0.0	1971.2	1188.9	3801.1	11092.7
Pozuelo del Rey	155.3	0.0	402.1	1636.3	3668.7	5862.4
Valdilecha	82.4	0.0	1141.7	2106.7	3315.8	6646.6
Villaviciosa de Odón	9524.0	0.0	661.4	2183.5	2958.0	15327.0
Estremera	622.4	0.0	5265.2	3251.3	2898.1	12037.0
Pinto	5766.9	0.0	1193.1	722.7	2877.0	10559.7
Fuenlabrada	3765.1	0.0	910.5	686.4	2793.7	8155.8
Arganda del Rey	7431.1	0.0	2311.4	2363.7	2655.4	14761.6
Perales de Tajuña	762.2	0.0	5371.9	2701.3	2555.5	11390.9
Villamanta	1554.8	0.0	276.0	4400.7	2523.2	8754.7
Torres de la Alameda	1166.1	0.0	3078.7	3023.5	2493.5	9761.9
Belmonte de Tajo	120.5	0.0	1690.7	2044.3	2333.0	6188.6
Moraleja de Enmedio	3289.5	0.0	278.4	491.0	2289.7	6348.5
Brunete	3095.4	0.0	194.5	1899.2	2277.5	7466.5
Valdaracete	216.6	0.0	4535.5	3545.9	2229.6	10527.6
Casarrubios del Monte	1289.0	0.0	34.9	765.7	2205.5	4295.0
Parla	1260.9	0.0	230.8	181.5	2203.2	3876.3
Loeches	1614.8	0.0	2966.0	2809.2	2164.4	9554.4
Alcorcón	2843.4	0.0	888.3	1000.1	2107.2	6838.9
Griñón	640.3	0.0	98.0	146.1	2077.3	2961.8
Getafe	9011.2	0.0	796.4	743.8	2075.1	12626.4
Santorcaz	166.9	0.0	556.9	1270.0	1946.8	3940.7
Almoguera	230.3	0.0	5531.1	3326.1	1930.0	11017.4
Morata de Tajuña	748.5	0.0	2332.0	1545.0	1890.8	6516.3

Humanes de Madrid	666.6	0.0	95.0	116.8	1879.7	2758.1
Villaconejos	172.9	0.0	2051.1	1124.3	1826.2	5174.5
Paracuellos de Jarama	3616.3	0.0	1351.4	2289.3	1754.2	9011.2
Pezuela de las Torres	337.2	7.7	861.9	2324.5	1707.9	5239.3
Villanueva de la Cañada	3524.8	0.0	548.2	2072.0	1706.1	7851.2
Móstoles	3785.3	0.0	490.0	778.4	1686.4	6740.1
Valdelaguna	198.3	0.0	4148.0	2337.2	1660.4	8343.9
Algete	5613.4	0.0	1091.2	1684.5	1560.1	9949.3
Villalbilla	948.6	0.0	2567.4	2207.6	1546.1	7269.8
Corpa	149.5	0.0	681.2	1397.4	1518.4	3746.6
Fuentidueña de Tajo	596.9	0.0	4008.8	1970.1	1402.9	7978.7
Ciempozuelos	6925.7	0.0	999.6	427.5	1371.2	9724.0
Torrejón de la Calzada	410.7	0.0	77.6	84.6	1354.7	1927.5
Aranjuez	15849.6	0.0	4563.0	866.7	1304.0	22583.3
El Álamo	1294.4	0.0	29.7	317.5	1303.9	2945.5
Leganés	3879.1	0.0	1022.1	567.2	1285.4	6753.8
Villar del Olmo	437.1	0.0	1380.2	1569.8	1284.6	4671.7
Alcalá de Henares	8501.5	0.0	3748.0	1693.3	1282.9	15225.6
San Martín de la Vega	12481.8	0.0	1470.1	1213.9	1233.6	16399.2
Fuente el Saz de Jarama	2149.2	0.0	420.7	980.8	1207.8	4758.5
Colmenar Viejo	18628.0	24.5	12801.1	4347.0	1188.2	36988.7
Cubas de la Sagra	415.3	0.0	64.9	70.6	1186.8	1737.5
San Sebastián de los Reyes	7106.0	0.0	3396.2	1118.1	1185.3	12805.6
Valdemorillo	8175.2	0.0	4821.8	3019.3	1154.1	17170.5
Carabaña	750.8	0.0	3252.9	2675.4	1141.1	7820.2
Serranillos del Valle	1814.2	0.0	39.1	379.2	1111.1	3343.7
Anchuelo	140.4	0.0	1768.4	1702.6	1103.2	4714.6
Boadilla del Monte	5373.3	0.0	754.7	1366.0	1057.9	8551.9
Nuevo Baztán	695.7	0.0	707.6	860.2	1028.1	3291.5
San Fernando de Henares	4595.1	0.0	1432.7	974.9	1008.9	8011.7
Villamanrique de Tajo	274.5	0.0	2522.4	1076.6	1000.5	4874.0
El Molar	1090.6	0.0	4081.3	2239.8	958.6	8370.3
Cobeña	2235.9	0.0	381.2	1027.2	919.3	4563.6
Olmeda de las Fuentes	0.0	0.0	459.3	1293.4	892.9	2645.5

Torrejón de Ardoz	3367.4	0.0	788.0	538.8	882.5	5576.8
Rivas-Vaciamadrid	10509.2	0.0	1536.5	631.6	841.3	13518.7
Los Santos de la Humosa	482.8	0.0	1827.3	1923.7	798.7	5032.5
Quijorna	2865.3	0.0	276.0	1094.4	790.2	5025.9
Pozuelo de Alarcón	3639.1	0.0	931.8	1202.1	740.0	6513.1
Valdetorres de Jarama	3810.2	0.0	900.7	1021.6	731.7	6464.2
El Escorial	4336.4	47.0	4836.9	4378.0	720.4	14318.6
Valverde de Alcalá	32.4	0.0	965.5	829.8	711.8	2539.5
Ambite	381.9	3.6	1237.9	1656.8	700.9	3981.1
Brea de Tajo	138.2	0.0	2423.0	1973.7	689.0	5223.9
Ajalvir	3551.5	0.0	47.8	756.3	685.9	5041.5
Alcobendas	7612.3	0.0	3557.9	719.2	671.1	12560.5
Arroyomolinos	2196.9	0.0	293.1	283.4	608.9	3382.4
Majadahonda	4342.2	0.0	422.3	941.2	539.9	6245.6
Santa Cruz de la Zarza	271.0	0.0	1679.7	569.7	531.1	3051.6
Tielmes	468.3	0.0	2635.8	1089.0	476.8	4670.0
Galapagar	9409.9	0.0	1448.1	1243.0	457.3	12558.3
Villanueva del Pardillo	2690.5	0.0	160.3	887.8	450.2	4188.8
Talamanca de Jarama	5689.4	0.0	1325.5	1074.0	423.6	8512.6
Las Rozas de Madrid	9042.0	0.0	622.3	857.4	410.6	10932.3
San Lorenzo de El Escorial	4915.0	183.4	4032.1	3868.3	409.0	13407.8
Illescas	71.0	0.0	9.3	25.2	396.0	501.5
Barajas de Melo	42.5	0.0	191.9	520.6	390.0	1144.9
Mejorada del Campo	1563.4	0.0	494.4	427.0	384.6	2869.4
Sevilla la Nueva	2956.1	0.0	8.1	273.0	373.6	3610.7
Batres	2460.9	0.0	36.1	228.0	366.3	3091.3
Orusco de Tajuña	278.2	0.0	1775.3	1220.5	351.2	3625.3
San Agustín del Guadalix	2308.8	0.0	2508.0	2105.6	347.6	7270.0
Casarrubuelos	84.9	0.0	15.3	17.5	328.0	445.7
Belinchón	0.0	0.0	27.8	281.0	303.3	612.1
Meco	3519.8	0.0	685.3	149.3	299.4	4653.8
Ugena	42.7	0.0	4.2	10.2	295.7	352.8
Colmenarejo	4203.7	0.0	1398.3	605.7	295.2	6502.9
Carranque	180.9	0.0	7.3	132.2	263.9	584.3

Villanueva de Perales	6240.6	0.0	9.6	201.9	261.3	6713.4
Tres Cantos	5537.2	0.0	2296.2	599.8	228.8	8662.0
Seseña	1614.7	0.0	750.8	46.6	215.4	2627.5
El Vellón	618.6	0.0	3692.6	980.4	205.0	5496.6
San Martín de Valdeiglesias	17595.7	0.1	1110.5	414.8	191.3	19312.4
Robledo de Chavela	22531.3	166.1	3798.4	748.3	185.9	27430.0
Navalagamella	14647.5	0.0	830.3	212.0	143.4	15833.2
Soto del Real	4898.3	64.6	2590.4	3139.1	137.9	10830.3
Titulcia	1558.8	0.0	461.8	133.6	130.2	2284.4
Zarzalejo	1089.2	108.2	2068.7	468.2	110.0	3844.3
Guadarrama	5997.4	102.6	1871.1	3600.6	108.5	11680.1
Villamantilla	3634.9	0.0	0.4	378.4	106.6	4120.3
El Tiemblo	499.4	0.0	306.8	158.5	100.6	1065.2
Pedrezuela	1844.9	0.0	3478.9	438.4	98.2	5860.5
Méntrida	497.0	0.0	3.8	547.6	97.8	1146.2
Alpedrete	1345.9	0.0	550.4	594.7	89.1	2580.0
Torrelaguna	253.8	93.4	4446.2	2370.8	88.0	7252.2
Velilla de San Antonio	2582.9	0.0	149.4	87.6	86.5	2906.4
Villarrubia de Santiago	31.2	0.0	487.7	160.3	81.9	761.0
Torremocha de Jarama	197.0	92.6	2138.7	1472.3	72.2	3972.8
Santa María de la Alameda	4026.5	937.2	6487.4	1667.3	71.8	13190.1
Noblejas	303.4	0.0	242.4	21.4	71.5	638.7
Coslada	1219.9	0.0	438.2	105.3	70.0	1833.3
Collado Villalba	3985.5	36.2	518.8	507.1	64.6	5112.2
Mondéjar	267.1	0.2	394.2	215.0	56.0	932.5
Uceda	1178.8	0.6	578.1	795.5	52.4	2605.4
Moralzarzal	12035.3	36.2	484.5	1338.8	47.2	13942.1
Manzanares el Real	19705.9	629.1	425.0	1787.9	42.8	22590.7
Becerril de la Sierra	17318.8	59.5	716.1	1943.8	42.7	20080.9
Cadalso de los Vidrios	6050.0	2.9	993.7	264.8	30.7	7342.2
Esquivias	0.0	0.0	16.8	11.0	30.6	58.3
Camarma de Esteruelas	6578.6	0.0	2.4	11.8	30.3	6623.1
Chiloeches	0.0	0.0	8.5	26.7	28.3	63.5
Zarza de Tajo	0.0	0.0	1.7	27.0	26.9	55.7
Guadalix de la Sierra	1280.2	63.2	7474.8	1308.1	25.7	10152.0
Valmojado	0.0	0.0	7.7	114.8	22.9	145.4

Azuqueca de Henares	132.1	0.0	161.7	246.8	22.6	563.1
Miraflores de la Sierra	6227.6	335.3	3562.8	3372.0	20.8	13518.4
El Boalo	13847.4	25.1	171.2	1190.2	19.3	15253.2
Pozo de Guadalajara	0.0	0.0	13.9	7.9	18.1	39.8
Collado Mediano	1260.6	29.9	1364.5	859.6	16.3	3530.9
Aldea del Fresno	8584.9	0.0	11.3	60.9	14.4	8671.5
Venturada	215.5	0.0	1087.0	349.6	13.1	1665.3
Cabanillas de la Sierra	144.0	2.4	1810.0	517.8	10.4	2484.7
Valdepiélagos	3436.1	0.0	33.6	28.5	9.8	3508.1
La Cabrera	253.8	451.1	2079.2	796.7	8.9	3589.6
Rozas de Puerto Real	3373.4	4.2	437.7	71.8	8.6	3895.8
Daganzo de Arriba	8956.4	0.0	23.9	4.8	6.5	8991.6
Yeles	0.0	0.0	6.8	1.7	4.2	12.7
Redueña	157.5	1.0	1584.4	524.9	3.4	2271.3
Ocaña	3192.1	0.0	527.3	35.1	3.2	3757.6
Almorox	2839.3	0.0	172.6	33.4	2.5	3047.8
Pioz	0.0	0.0	0.3	3.4	1.9	5.6
Torrelodones	3371.5	0.0	195.3	13.9	1.0	3581.9
Navalafuente	204.8	0.0	1148.2	247.5	1.0	1601.5
El Casar	1779.8	0.0	23.4	4.1	0.6	1807.9
Ontígola	2854.4	0.0	396.8	9.3	0.6	3261.1
Patones	1059.7	1085.8	2116.1	175.6	0.6	4437.8
Bustarviejo	5442.6	261.2	2500.3	1373.2	0.5	9577.8
Navahondilla	253.5	0.2	149.0	11.8	0.3	414.9
El Berrueco	612.4	478.0	2960.2	584.4	0.3	4635.5
Fuentenovilla	200.2	7.0	103.9	7.9	0.2	319.3
Navacerrada	4116.5	77.4	519.6	444.2	0.2	5157.9
Valdemanco	311.3	390.3	2004.9	164.4	0.1	2871.0
Pinilla del Valle	5028.3	1907.2	736.6	526.4	0.0	8198.4
Piñuécar-Gandullas	512.9	943.6	785.6	1911.3	0.0	4153.4
Prádena del Rincón	1040.7	2114.2	878.3	681.8	0.0	4714.9
Puebla de la Sierra	5813.3	344.8	12.9	0.0	0.0	6171.0
Rascafría	19363.3	2612.5	1107.0	539.7	0.0	23622.5
Ribatejada	5165.6	0.0	14.1	1.1	0.0	5180.8
Robledillo de la Jara	881.6	900.0	1990.9	606.6	0.0	4379.0
Robregordo	1044.8	2319.0	148.4	25.8	0.0	3538.0
La Serna del Monte	11.9	470.5	288.4	815.4	0.0	1586.2

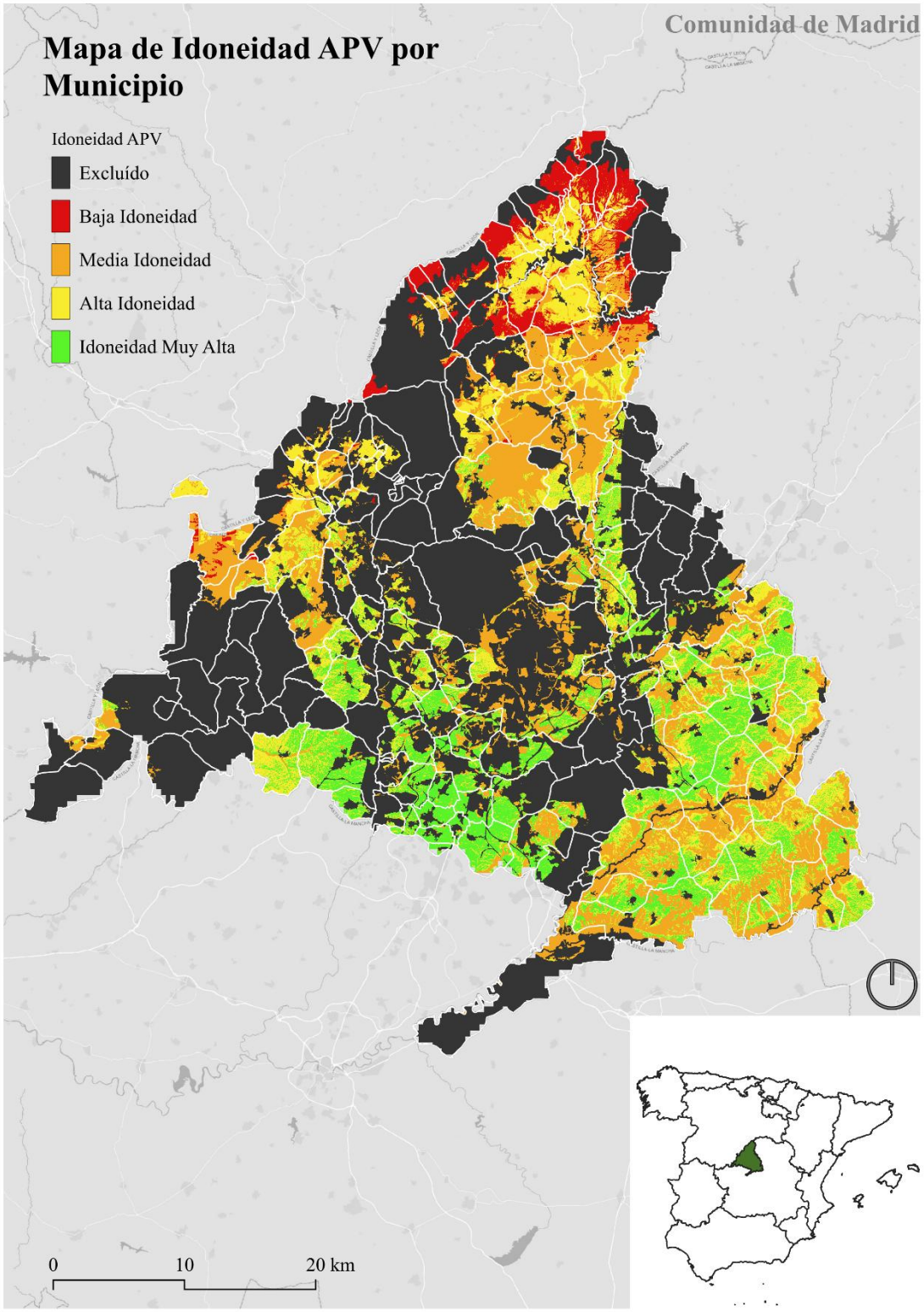
Somosierra	1324.6	1487.0	118.0	20.1	0.0	2949.6
Valdeavero	2119.7	0.0	15.7	0.7	0.0	2136.2
Valdemaqueda	7454.8	70.2	367.2	0.0	0.0	7892.3
Valdeolmos-Alalpardo	4426.4	0.0	0.0	0.0	0.0	4426.4
Villa del Prado	9234.0	0.0	173.2	0.0	0.0	9407.2
Villavieja del Lozoya	1919.3	2506.7	606.0	1488.6	0.0	6520.6
Lozoyuela-Navas-Sieteiglesias	189.8	1568.9	2145.2	4382.0	0.0	8286.0
Puentes Viejas	3262.4	2729.4	4832.5	6023.2	0.0	16847.6
Los Baldios	1240.1	35.3	3.7	0.0	0.0	1279.1
El Redegüelo	166.5	0.0	0.0	0.0	0.0	166.5
Casillas	1.5	0.0	0.1	0.0	0.0	1.6
Cebreros	485.7	4.1	7.2	0.0	0.0	497.0
Higuera de las Dueñas	12.7	0.0	0.0	0.0	0.0	12.7
El Hoyo de Pinares	127.8	0.0	0.0	0.0	0.0	127.8
Las Navas del Marqués	534.4	132.9	330.5	0.0	0.0	997.8
Peguerinos	667.8	148.7	740.1	852.5	0.0	2409.2
San Bartolomé de Pinares	7.9	0.0	0.8	0.0	0.0	8.7
Santa María del Tiétar	244.4	1.4	0.7	0.0	0.0	246.4
Sotillo de la Adrada	37.7	0.0	1.0	0.0	0.0	38.7
Aldealengua de Pedraza	260.0	2.1	0.1	0.0	0.0	262.3
Arcones	129.0	3.9	0.0	0.0	0.0	132.9
Basardilla	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Casla	0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	1.1
Collado Hermoso	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6
El Espinar	5027.4	58.4	717.9	2392.4	0.0	8196.1
Gallegos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Matabuena	18.0	0.3	0.1	0.0	0.0	18.4
Navafría	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Palazuelos de Eresma	12.4	0.0	0.0	0.0	0.0	12.4
Prádena	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Real Sitio de San Ildefonso	1606.6	629.0	4.2	0.0	0.0	2239.9
Santo Domingo de Pirón	0.0	47.2	0.3	0.0	0.0	47.5
Santo Tomé del Puerto	53.4	67.2	21.5	5.1	0.0	147.2
Sotosalbos	0.0	19.6	0.0	0.0	0.0	19.6
Torrecaballeros	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2

Torre Val de San Pedro	0.0	164.0	1.0	0.0	0.0	165.0
Trescasas	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9
Campillo de Ranas	20.2	0.5	0.0	0.0	0.0	20.7
El Cardoso de la Sierra	4959.1	3412.2	681.5	466.9	0.0	9519.7
Galápagos	74.1	0.0	3.4	0.2	0.0	77.8
Loranca de Tajuña	0.7	0.0	103.5	10.9	0.0	115.1
Torrejón del Rey	946.9	0.0	13.4	1.3	0.0	961.5
Tortuero	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0	25.7
Valdeaveruelo	174.8	0.0	4.2	0.0	0.0	179.1
Valdepeñas de la Sierra	1519.5	139.1	32.4	0.0	0.0	1691.0
Villanueva de la Torre	281.5	0.0	0.6	0.0	0.0	282.0
Aldea en Cabo	104.6	0.0	1.5	0.0	0.0	106.1
Almonacid de Toledo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Añover de Tajo	1317.1	0.0	84.7	0.0	0.0	1401.8
Borox	403.6	0.0	1.6	0.0	0.0	405.2
Mocejón	25.9	0.0	5.6	0.0	0.0	31.5
Nombela	33.1	0.0	1.0	0.0	0.0	34.0
Paredes de Escalona	90.5	0.0	0.0	0.0	0.0	90.5
Pelahustán	177.2	0.0	0.4	0.0	0.0	177.7
Santa Cruz del Retamar	3296.1	0.0	79.7	0.0	0.0	3375.9
Toledo	177.8	0.0	0.8	0.1	0.0	178.7
Villaseca de la Sagra	175.8	0.0	3.9	0.0	0.0	179.7
Yepes	2197.8	0.0	28.3	0.1	0.0	2226.2
La Acebeda	871.5	2076.4	71.0	11.1	0.0	3030.1
Alameda del Valle	6073.4	2113.4	844.5	506.5	0.0	9537.9
El Atazar	3024.1	380.6	202.5	0.0	0.0	3607.3
Berzosa del Lozoya	457.7	914.8	1343.3	230.4	0.0	2946.2
Braojos	1998.6	1671.4	308.1	404.7	0.0	4382.7
Buitrago del Lozoya	1395.7	297.5	762.2	3435.5	0.0	5890.9
Canencia	6755.9	2637.3	819.3	870.5	0.0	11083.0
Cenicientos	7094.7	0.0	4.9	0.0	0.0	7099.7
Cercedilla	4022.5	23.9	313.5	385.9	0.0	4745.9
Cervera de Buitrago	998.7	203.4	597.2	259.3	0.0	2058.5
Colmenar del Arroyo	10841.1	0.0	0.0	0.0	0.0	10841.1
Chapinería	4025.3	0.0	0.0	0.0	0.0	4025.3

Fresnedillas de la Oliva	5396.9	0.0	2.6	0.0	0.0	5399.5
Fresno de Torote	5001.4	0.0	0.3	0.7	0.0	5002.4
Garganta de los Montes	638.0	2543.3	1674.5	2609.1	0.0	7464.9
Gargantilla del Lozoya y Pinilla de Buitrago	866.6	808.6	656.8	2695.5	0.0	5027.6
Gascones	2254.9	1843.3	703.3	1423.1	0.0	6224.6
La Hiruela	1957.1	327.0	2.9	0.0	0.0	2287.0
Horcajo de la Sierra-Aoslos	90.4	2431.0	447.4	632.3	0.0	3601.1
Horcajuelo de la Sierra	967.2	2198.3	410.6	343.8	0.0	3920.0
Hoyo de Manzanares	7018.7	0.2	0.0	0.0	0.0	7018.9
Lozoya	5749.6	1796.8	506.4	607.5	0.0	8660.3
Madarcos	59.1	586.5	302.1	281.6	0.0	1229.3
Los Molinos	2080.8	19.5	322.5	911.3	0.0	3334.2
Montejo de la Sierra	1710.7	2704.9	416.7	281.6	0.0	5114.0
Navarredonda y San Mamés	851.4	2471.1	468.9	1171.4	0.0	4962.7
Navas del Rey	9478.4	0.0	2.1	0.0	0.0	9480.5
Pelayos de la Presa	1325.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1325.8

Elaboración Propia mediante PyGIS

Anexo 15. Mapa de Idoneidad por Municipio



Elaboración Propia

CÓDIGOS ANEXOS

Anexo C. 1 Script de asignación de idoneidad por centroide a parcelas SIGPAC

```
import processing
from qgis.core import QgsProject, QgsVectorLayer, QgsField, QgsFeature
from qgis.PyQt.QtCore import QVariant
from osgeo import gdal
import numpy as np

# ── CONFIGURACIÓN ──────────────────────────────────────────────────────────
RASTER_NAME = 'idoneidad_clasificada'
VECTOR_NAME = 'sigpac_corregido'
CAMPO_USO = 'USO_SIGPAC'
CARPETA_SALIDA = 'C:/Users/jnbor_irnb7ud/Desktop/TFM'

categorias = {
    0: 'Excluido',
    1: 'Baja Idoneidad',
    2: 'Media Idoneidad',
    3: 'Alta Idoneidad',
    4: 'Idoneidad Muy Alta'
}

# ── OBTENER CAPAS ──────────────────────────────────────────────────────────
project = QgsProject.instance()
raster = project.mapLayersByName(RASTER_NAME)[0]
vector = project.mapLayersByName(VECTOR_NAME)[0]

print(f"Ráster: {raster.name()}")
print(f"Vector: {vector.name()}")

# ── REPROYECTAR VECTOR A 25830 ─────────────────────────────────────────────
print("\nReproyectando SIGPAC a EPSG:25830...")
vector_repr = processing.run("native:reprojectlayer", {
    'INPUT': vector,
    'TARGET_CRS': 'EPSG:25830',
```

```
    'OUTPUT': 'TEMPORARY_OUTPUT'
})['OUTPUT']
print("Reproyección completada - OK")

# ── FILTRAR SOLO OV Y VI ──────────────────────────────────────────────
print("\nFiltrando OV y VI...")
vector_vi = processing.run("native:extractbyattribute", {
    'INPUT': vector_repr,
    'FIELD': CAMPO_USO,
    'OPERATOR': 0,
    'VALUE': 'VI',
    'OUTPUT': 'TEMPORARY_OUTPUT'
})['OUTPUT']

vector_ov = processing.run("native:extractbyattribute", {
    'INPUT': vector_repr,
    'FIELD': CAMPO_USO,
    'OPERATOR': 0,
    'VALUE': 'OV',
    'OUTPUT': 'TEMPORARY_OUTPUT'
})['OUTPUT']

vector_ov_vi = processing.run("native:mergevectorlayers", {
    'LAYERS': [vector_vi, vector_ov],
    'CRS': 'EPSG:25830',
    'OUTPUT': 'TEMPORARY_OUTPUT'
})['OUTPUT']
print(f"Parcelas OV+VI encontradas: {vector_ov_vi.featureCount()}")

# ── LEER RÁSTER CON GDAL ──────────────────────────────────────────────
print("\nLeyendo ráster de idoneidad...")
ruta_raster = raster.source()
ds = gdal.Open(ruta_raster)
banda = ds.GetRasterBand(1)
array = banda.ReadAsArray()
```

```
transform = ds.GetGeoTransform()
print("Ráster leído - OK")

# ── GUARDAR CAPA OV/VI BASE ──────────────────────────────────────────
import os
os.makedirs(CARPETA_SALIDA, exist_ok=True)
ruta_salida = CARPETA_SALIDA + '/priorizacion_APV_OV_VI.shp'

print("\nGuardando capa base...")
processing.run("native:savefeatures", {
    'INPUT': vector_ov_vi,
    'OUTPUT': ruta_salida
})
print("Capa base guardada - OK")

# ── CARGAR CAPA PARA EDITAR ──────────────────────────────────────────
layer_out = QgsVectorLayer(ruta_salida, 'priorizacion_APV_OV_VI', 'ogr')

# ── AÑADIR CAMPOS DE IDONEIDAD ──────────────────────────────────────
print("\nAñadiendo campos de idoneidad...")
layer_out.startEditing()
layer_out.dataProvider().addAttributes([
    QgsField('IDO_VALOR', QVariant.Int),
    QgsField('IDO_CLASE', QVariant.String, len=25)
])
layer_out.updateFields()

idx_valor = layer_out.fields().indexOf('IDO_VALOR')
idx_clase = layer_out.fields().indexOf('IDO_CLASE')

# ── EXTRAER VALOR DE IDONEIDAD POR CENTROIDE ─────────────────────────
print("Extrayendo valores de idoneidad por parcela...")
contador = 0

for feature in layer_out.getFeatures():
```

```
    geom = feature.geometry()
    if geom is None or geom.isEmpty():
        continue

    centroide = geom.centroid().asPoint()
    x, y = centroide.x(), centroide.y()

    col = int((x - transform[0]) / transform[1])
    fila = int((y - transform[3]) / transform[5])

    if 0 <= fila < array.shape[0] and 0 <= col < array.shape[1]:
        valor_ido = int(array[fila, col])
        clase = categorias.get(valor_ido, 'Sin dato')
        layer_out.changeAttributeValue(feature.id(), idx_valor, valor_ido)
        layer_out.changeAttributeValue(feature.id(), idx_clase, clase)

    contador += 1
    if contador % 5000 == 0:
        print(f"  Procesadas {contador} parcelas...")

layer_out.commitChanges()
print(f"Total procesadas: {contador}")

# ── AÑADIR AL PROYECTO ──────────────────────────────────────────────
QgsProject.instance().addMapLayer(layer_out)
print(f"\nCapa guardada en: {ruta_salida}")
print("Capa añadida al proyecto - OK")
print("\nProceso completado.")
```

Anexo C. 2 Script de selección de parcelas representativas

```
from qgis.core import QgsProject, QgsCoordinateReferenceSystem, QgsCoordinateTransform
import math

layer = QgsProject.instance().mapLayersByName('priorizacion_APV_OV_VI')[0]
crs_src = QgsCoordinateReferenceSystem('EPSG:25830')
crs_dst = QgsCoordinateReferenceSystem('EPSG:4326')
transform = QgsCoordinateTransform(crs_src, crs_dst, QgsProject.instance())

categorias_buscadas = ['Baja Idoneidad', 'Media Idoneidad', 'Alta Idoneidad', 'Idoneidad Muy Alta']

# Paso 1: para cada clase, quedarnos con el polígono VI de MAYOR ÁREA (no el primero que aparezca)
mejor_por_clase = {}  # clase -> (area, feature)
for feature in layer.getFeatures():
    uso = feature['USO_SIGPAC']
    clase = feature['IDO_CLASE']
    if uso == 'VI' and clase in categorias_buscadas:
        area = feature.geometry().area()
        if clase not in mejor_por_clase or area > mejor_por_clase[clase][0]:
            mejor_por_clase[clase] = (area, feature)

# Paso 2: centroide de cada polígono ganador, transformado a lat/lon
encontradas = {}
for clase, (area, feature) in mejor_por_clase.items():
    centroide = feature.geometry().centroid().asPoint()
    punto_geo = transform.transform(centroide)
    encontradas[clase] = (round(punto_geo.y(), 6), round(punto_geo.x(), 6), area)

# Paso 3: verificar distancia mínima entre puntos (Haversine, en metros)
def haversine(lat1, lon1, lat2, lon2):
    R = 6371000
    phi1, phi2 = math.radians(lat1), math.radians(lat2)
    dphi = math.radians(lat2 - lat1)
    dlambda = math.radians(lon2 - lon1)
    a = math.sin(dphi/2)**2 + math.cos(phi1)*math.cos(phi2)*math.sin(dlambda/2)**2
```

```
    return 2*R*math.asin(math.sqrt(a))


print("--- Puntos representativos (mayor polígono VI por clase) ---")
for cat, (lat, lon, area) in encontradas.items():
    print(f"{cat}: Lat {lat}, Lon {lon}  (área parcela: {area/10000:.2f} ha)")


print("\n--- Distancias entre clases (m) ---")
clases = list(encontradas.keys())
for i in range(len(clases)):
    for j in range(i+1, len(clases)):
        c1, c2 = clases[i], clases[j]
        d = haversine(encontradas[c1][0], encontradas[c1][1], encontradas[c2][0], encontradas[c2][1])
        alerta = "  MISMA CELDA PVGIS" if d < 5000 else ""
        print(f"{c1} - {c2}: {d/1000:.2f} km{alerta}")
```

Anexo C. 3 Script de cálculo zonal y agregación por municipios

```
import processing
from qgis.core import QgsProject
from osgeo import gdal
import numpy as np
import csv
import os

# ── CONFIGURACIÓN ──────────────────────────────────────────────────────────
RASTER_NAME = 'priorizacion_APV_OV_VI copiar'
MUNICIPIOS_NAME = 'Municipios_madrid'
CAMPO_MUNICIPIO = 'NAMEUNIT'
CARPETA_SALIDA = 'C:/Users/jnbor_irnb7ud/Desktop/TFM'

categorias = {
    0: 'Excluido',
    1: 'Baja Idoneidad',
    2: 'Media Idoneidad',
    3: 'Alta Idoneidad',
    4: 'Idoneidad Muy Alta'
}

# ── OBTENER CAPAS ──────────────────────────────────────────────────────────
project = QgsProject.instance()
raster = project.mapLayersByName(RASTER_NAME)[0]
municipios = project.mapLayersByName(MUNICIPIOS_NAME)[0]

print(f"Ráster: {raster.name()}")
print(f"Municipios: {municipios.name()}")
print(f"Total municipios: {municipios.featureCount()}")

# ── REPROYECTAR MUNICIPIOS A 25830 SI HACE FALTA ──────────────────────────
if municipios.crs().authid() != 'EPSG:25830':
    print("\nReproyectando municipios a EPSG:25830...")
    municipios_repr = processing.run("native:reprojectlayer", {
```

```
        'INPUT': municipios,
        'TARGET_CRS': 'EPSG:25830',
        'OUTPUT': 'TEMPORARY_OUTPUT'
    })['OUTPUT']
    print("OK")
else:
    municipios_repr = municipios
    print("Municipios ya en EPSG:25830 - OK")

# ── LEER RÁSTER CON GDAL ──────────────────────────────────────────────
print("\nLeyendo ráster...")
ruta_raster = raster.source()
ds = gdal.Open(ruta_raster)
banda = ds.GetRasterBand(1)
array = banda.ReadAsArray()
transform = ds.GetGeoTransform()
pixel_size = abs(transform[1])
area_pixel_ha = (pixel_size ** 2) / 10000
print(f"Resolución: {pixel_size:.2f} m | Área/píxel: {area_pixel_ha:.6f} ha")

# ── CALCULAR ÁREAS POR MUNICIPIO ──────────────────────────────────────
print("\nCalculando áreas por municipio...")
print("(Esto puede tardar unos minutos...)")

resultados = {}

for i, feature in enumerate(municipios_repr.getFeatures()):
    nombre = feature[CAMPO_MUNICIPIO]
    geom = feature.geometry()

    if geom is None or geom.isEmpty():
        continue

    # Obtener bounding box del municipio
    bbox = geom.boundingBox()
```

```
    x_min, x_max = bbox.xMinimum(), bbox.xMaximum()
    y_min, y_max = bbox.yMinimum(), bbox.yMaximum()

    # Convertir a índices del ráster
    col_min = max(0, int((x_min - transform[0]) / transform[1]))
    col_max = min(array.shape[1], int((x_max - transform[0]) / transform[1]) + 1)
    fila_min = max(0, int((y_max - transform[3]) / transform[5]))
    fila_max = min(array.shape[0], int((y_min - transform[3]) / transform[5]) + 1)

    # Recortar array al municipio
    subarray = array[fila_min:fila_max, col_min:col_max]

    # Contar píxeles por categoría
    areas = {}
    total_ha = 0
    for val, nombre_cat in categorias.items():
        n_pixeles = np.sum(subarray == val)
        ha = n_pixeles * area_pixel_ha
        areas[nombre_cat] = round(ha, 1)
        total_ha += ha

    areas['TOTAL'] = round(total_ha, 1)
    resultados[nombre] = areas

    if (i + 1) % 20 == 0:
        print(f"  Procesados {i+1} municipios...")

print(f"\nTotal municipios procesados: {len(resultados)}")

# ── ORDENAR POR IDONEIDAD MUY ALTA ──────────────────────────────────
resultados_ordenados = dict(
    sorted(resultados.items(),
           key=lambda x: x[1]['Idoneidad Muy Alta'],
           reverse=True)
)
```

```
# ── IMPRIMIR TOP 20 ──────────────────────────────────────────────────────────
print("\n" + "="*90)
print("TOP 20 MUNICIPIOS POR IDONEIDAD MUY ALTA")
print("="*90)
print(f"{'Municipio':<30} {'Excluido':>10} {'Baja':>8} {'Media':>10} {'Alta':>10} {'Muy Alta':>10} {'Total':>10}")
print("-"*90)

for i, (mun, areas) in enumerate(resultados_ordenados.items()):
    if i >= 20:
        break
    print(f"{mun:<30} {areas['Excluido']:>10.1f} {areas['Baja Idoneidad']:>8.1f} {areas['Media Idoneidad']:>10.1f} {areas['Alta Idoneidad']:>10.1f} {areas['Idoneidad Muy Alta']:>10.1f} {areas['TOTAL']:>10.1f}")

# ── GUARDAR CSV COMPLETO ─────────────────────────────────────────────────────
os.makedirs(CARPETA_SALIDA, exist_ok=True)
ruta_csv = CARPETA_SALIDA + '/idoneidad_por_municipio.csv'

with open(ruta_csv, 'w', newline='', encoding='utf-8-sig') as f:
    writer = csv.writer(f, delimiter=';')
    writer.writerow(['Municipio', 'Excluido (ha)', 'Baja Idoneidad (ha)',
                     'Media Idoneidad (ha)', 'Alta Idoneidad (ha)',
                     'Idoneidad Muy Alta (ha)', 'Total (ha)'])

    for mun, areas in resultados_ordenados.items():
        writer.writerow([
            mun,
            areas['Excluido'],
            areas['Baja Idoneidad'],
            areas['Media Idoneidad'],
            areas['Alta Idoneidad'],
            areas['Idoneidad Muy Alta'],
            areas['TOTAL']
        ])
```

```
print(f"\nCSV completo guardado en: {ruta_csv}")

print("\nProceso completado.")
```

Anexo C. 4. Script cálculo de áreas por municipio del límite del 4%

```
import csv
import os
import processing
from qgis.core import QgsProject

# ── CONFIGURACIÓN ──────────────────────────────────────────────────────────
CAPA_LIMITACION = "Idoneidad_FV_4%"
CAPA_MUNICIPIOS = "Municipios_madrid"
CAMPO_MUNICIPIO = "NAMEUNIT"  # Nombre de la columna del municipio
CARPETA_SALIDA = "C:/Users/jnbor_irnb7ud/Desktop/TFM"

# ── OBTENER CAPAS DEL PROYECTO ─────────────────────────────────────────────
project = QgsProject.instance()

try:
    capa_limit = project.mapLayersByName(CAPA_LIMITACION)[0]
    capa_muni = project.mapLayersByName(CAPA_MUNICIPIOS)[0]
except IndexError:
    print(
        " Error: Revisa que los nombres de las capas en la vista de QGIS coincidan exactamente."
    )

print(f"Capa de Limitación 4%: {capa_limit.name()}")
print(f"Capa de Municipios: {capa_muni.name()}")

# ── ASEGURAR PROYECCIÓN EPSG:25830 (UTM 30N) PARA MIDE HECTÁREAS ──
if capa_limit.crs().authid() != "EPSG:25830":
    print("\nReproyectando capa de limitación a EPSG:25830...")
    capa_limit = processing.run(
        "native:reprojectlayer",
        {
            "INPUT": capa_limit,
            "TARGET_CRS": "EPSG:25830",
            "OUTPUT": "TEMPORARY_OUTPUT",
```

```
    },
)["OUTPUT"]

if capa_muni.crs().authid() != "EPSG:25830":
    print("Reproyectando municipios a EPSG:25830...")
    capa_muni = processing.run(
        "native:reprojectlayer",
        {
            "INPUT": capa_muni,
            "TARGET_CRS": "EPSG:25830",
            "OUTPUT": "TEMPORARY_OUTPUT",
        },
    )["OUTPUT"]

# ── INTERSECCIÓN VECTORIAL ──────────────────────────────────────────
print("\nEjecutando intersección entre el límite del 4% y municipios...")
interseccion = processing.run(
    "native:intersection",
    {
        "INPUT": capa_muni,
        "OVERLAY": capa_limit,
        "INPUT_FIELDS": [CAMPO_MUNICIPIO],
        "OVERLAY_FIELDS": [],
        "OUTPUT": "TEMPORARY_OUTPUT",
    },
)["OUTPUT"]

# ── CALCULAR SUPERFICIE POR MUNICIPIO ──────────────────────────────
print("Sumando hectáreas de superficie limitada por municipio...")
areas_por_municipio = {}

for feat in interseccion.getFeatures():
    nombre_muni = feat[CAMPO_MUNICIPIO]
    geom = feat.geometry()
```

```
    if geom and not geom.isEmpty():
        # Área real exacta de la intersección en hectáreas
        area_ha = geom.area() / 10000.0
        areas_por_municipio[nombre_muni] = (
            areas_por_municipio.get(nombre_muni, 0.0) + area_ha
        )

# ── ORDENAR MUNICIPIOS DE MAYOR A MENOR ÁREA ──────────────────────
resultados_ordenados = sorted(
    areas_por_municipio.items(), key=lambda x: x[1], reverse=True
)

# ── IMPRIMIR RESULTADOS EN CONSOLA (TOP 20) ──────────────────────
print("\n" + "=" * 60)
print("TOP 20 MUNICIPIOS CON MAYOR ÁREA AFECTADA / DISPONIBLE (4%)")
print("=" * 60)
print(f"{'Municipio':<35} {'Superficie (ha)':>20}")
print("-" * 60)

for mun, ha in resultados_ordenados[:20]:
    print(f"{mun:<35} {ha:>20.2f}")

# ── GUARDAR RESULTADOS EN CSV
os.makedirs(CARPETA_SALIDA, exist_ok=True)
ruta_csv = os.path.join(CARPETA_SALIDA, "limitacion_4pct_por_municipio.csv")

with open(ruta_csv, "w", newline="", encoding="utf-8-sig") as f:
    writer = csv.writer(f, delimiter=";")
    writer.writerow(["Municipio", "Area_Limitacion_4pct_ha"])
    for mun, ha in resultados_ordenados:
        writer.writerow([mun, round(ha, 2)])
print("\n" + "=" * 60)
print(f" Proceso finalizado exitosamente.")
print(f"Archivo CSV generado en: {ruta_csv}")
print("=" * 60)
```

Anexo C. 5 Script para Verificación Fórmula 2

```
import numpy as np
from osgeo import gdal
from qgis.core import QgsProject

gdal.UseExceptions()

# --- configuración ------------------------------------------------------------
CAPA_INDICE = "idoneidad_final"

PESOS = {                          # criterio : (capa en el proyecto, peso)
    "Radiación solar":       ("criterio_radiacion",      0.25),
    "Pendiente":             ("criterio_pendiente",      0.10),
    "Orientación":           ("Criterio_aspecto",        0.05),
    "Capacidad agrológica":  ("criterio_agro",           0.20),
    "Red Natura 2000":       ("natura_final",            0.15),
    "Infraestructura eléct.": ("criterio_infraestructura", 0.15),
    "Vías de acceso":        ("criterio_vias",           0.10),
}
# ------------------------------------------------------------------------------

def abrir(nombre):
    """Devuelve la ruta en disco de una capa cargada en el proyecto."""
    capas = QgsProject.instance().mapLayersByName(nombre)
    if not capas:
        raise ValueError(f"La capa '{nombre}' no está cargada en el proyecto.")
    return capas[0].source()

def leer(ruta, bounds=None, nx=None, ny=None):
    """Lee un ráster como array, opcionalmente realineado a una rejilla dada."""
    if bounds is None:
        ds = gdal.Open(ruta)
    else:
        ds = gdal.Warp('', ruta, format='MEM', outputBounds=bounds,
                       width=nx, height=ny, resampleAlg='near')
    banda = ds.GetRasterBand(1)
    nodata = banda.GetNoDataValue()
    a = banda.ReadAsArray().astype(float)
    if nodata is not None:
        a[a == nodata] = np.nan
    ds = None                      # cierre explícito tras la lectura
    return a

# --- rejilla de referencia ----------------------------------------------------
ds_ref = gdal.Open(abrir(CAPA_INDICE))
gt = ds_ref.GetGeoTransform()
nx, ny = ds_ref.RasterXSize, ds_ref.RasterYSize
bounds = (gt[0], gt[3] + gt[5]*ny, gt[0] + gt[1]*nx, gt[3])
ds_ref = None

indice = leer(abrir(CAPA_INDICE))
valido = (~np.isnan(indice)) & (indice > 0)

# --- selección de los dos píxeles de contraste --------------------------------
aux = np.where(valido, indice, np.nan)
casos = {"máximo": np.nanargmax(aux), "mínimo": np.nanargmin(aux)}

# --- lectura de las capas de criterio -----------------------------------------
criterios = {etiq: (leer(abrir(capa), bounds, nx, ny), peso)
             for etiq, (capa, peso) in PESOS.items()}

# --- reconstrucción -----------------------------------------------------------
for etiqueta, plano in casos.items():
    fila, col = np.unravel_index(plano, indice.shape)
    x = gt[0] + (col + 0.5) * gt[1]
    y = gt[3] + (fila + 0.5) * gt[5]
```

```
print(f"\n{'='*68}")
print(f"PÍXEL DE ÍNDICE {etiqueta.upper()}   (X={x:.1f}  Y={y:.1f})")
print(f"{'='*68}")
print(f"{'criterio':26s}{'peso':>7s}{'valor':>12s}{'aporte':>12s}")
print("-" * 68)

total = 0.0
for etiq, (arr, peso) in criterios.items():
    val = arr[fila, col]
    val = 0.0 if np.isnan(val) else float(val)
    total += peso * val
    print(f"{etiq:26s}{peso:>7.2f}{val:>12.7f}{peso*val:>12.7f}")

observado = indice[fila, col]
print("-" * 68)
print(f"{'Índice reconstruido':40s}{total:>16.10f}")
print(f"{'Índice almacenado en el ráster':40s}{observado:>16.10f}")
print(f"{'Discrepancia':40s}{abs(total-observado):>16.2e}")
```

Anexo C. 6 Script para Verificación de los umbrales de clasificación

```
import numpy as np
from osgeo import gdal
from qgis.core import QgsProject

gdal.UseExceptions()

# --- configuración ------------------------------------------------------------
CAPA_INDICE      = "idoneidad_final"
CAPA_CLASIFICADA = "idoneidad_clasificada"
UMBRALES         = [0.40, 0.60, 0.75]
ETIQUETAS        = ["Baja", "Media", "Alta", "Muy alta"]
ALTERNATIVAS     = [[0.40, 0.60, 0.80], [0.45, 0.60, 0.75], [0.40, 0.65, 0.75]]
# ------------------------------------------------------------------------------

def ruta(nombre):
    return QgsProject.instance().mapLayersByName(nombre)[0].source()

ds = gdal.Open(ruta(CAPA_INDICE))
gt = ds.GetGeoTransform()
nx, ny = ds.RasterXSize, ds.RasterYSize
bounds = (gt[0], gt[3] + gt[5]*ny, gt[0] + gt[1]*nx, gt[3])
banda = ds.GetRasterBand(1)
nodata = banda.GetNoDataValue()
indice = banda.ReadAsArray().astype(float)
if nodata is not None:
    indice[indice == nodata] = np.nan
ds = None

ds_cls = gdal.Warp('', ruta(CAPA_CLASIFICADA), format='MEM',
                   outputBounds=bounds, width=nx, height=ny, resampleAlg='near')
clases = ds_cls.GetRasterBand(1).ReadAsArray().astype(float)
ds_cls = None

valido = (~np.isnan(indice)) & (indice > 0)
v = indice[valido]
px_ha = abs(gt[1] * gt[5]) / 10000

# --- conteo de referencia en el ráster clasificado ----------------------------
referencia = [int((valido & (clases == c)).sum()) for c in (1, 2, 3, 4)]

def reclasificar(cortes):
    limites = [0] + list(cortes) + [2]
    return [int(((v >= lo) & (v < hi)).sum())
            for lo, hi in zip(limites[:-1], limites[1:])]

def discrepancia(conteo):
    return sum(abs(a - b) for a, b in zip(conteo, referencia)) / sum(referencia) * 100

# --- verificación -------------------------------------------------------------
print("VERIFICACIÓN DE LOS UMBRALES DECLARADOS\n")
conteo = reclasificar(UMBRALES)
print(f"{'clase':<12}{'intervalo':>18}{'reconstruido':>15}{'ráster':>12}{'ha':>13}")
print("-" * 70)
limites = [round(v.min(), 3)] + UMBRALES + [round(v.max(), 3)]
for i, etq in enumerate(ETIQUETAS):
    print(f"{etq:<12}{f'{limites[i]:.3f} – {limites[i+1]:.3f}':>18}"
          f"{conteo[i]:>15,d}{referencia[i]:>12,d}{conteo[i]*px_ha:>13,.2f}")
print("-" * 70)
print(f"Discrepancia global: {discrepancia(conteo):.2f} %\n")

# --- contraste con juegos alternativos ----------------------------------------
print("CONTRASTE CON UMBRALES ALTERNATIVOS")
for alt in ALTERNATIVAS:
    print(f"   {alt} -> discrepancia {discrepancia(reclasificar(alt)):5.2f} %")
```

```
# --- contraste con métodos automáticos de partición --------------------------
mn, mx, mu, sd = v.min(), v.max(), v.mean(), v.std()
print("\nUMBRALES QUE HABRÍAN PRODUCIDO LOS MÉTODOS AUTOMÁTICOS")
print("   intervalos iguales:",
    [round(mn + k*(mx-mn)/4, 3) for k in (1, 2, 3)])
print("   cuantiles         :",
    [round(x, 3) for x in np.percentile(v, [25, 50, 75])])
print("   desviación típica :",
    [round(mu + k*sd, 3) for k in (-1, 0, 1)])
print("   umbrales aplicados:", UMBRALES)
```

Anexo C. 7 Script para Comportamiento de criterios

```
import numpy as np
from osgeo import gdal
from qgis.core import QgsProject

gdal.UseExceptions()

# --- configuración ------------------------------------------------------
CAPA_INDICE = "idoneidad_final"

PESOS = {
    "Capacidad agrológica":   ("criterio_agro",           0.20),
    "Radiación solar":        ("criterio_radiacion",      0.25),
    "Pendiente":              ("criterio_pendiente",      0.10),
    "Orientación":            ("Criterio_aspecto",        0.05),
    "Infraestructura eléct.": ("criterio_infraestructura", 0.15),
    "Vías de acceso":         ("criterio_vias",           0.10),
    "Red Natura 2000":        ("natura_final",            0.15),
}

DISTANCIAS = {                    # capa : denominador de normalización (m)
    "dist_vias":                  59140.4,
    "dist_redAT":                 62472.5,
    "distancia_subestaciones25830": 63895.8,
}
# ------------------------------------------------------------------------

def ruta(nombre):
    return QgsProject.instance().mapLayersByName(nombre)[0].source()

def leer_alineado(r, bounds, nx, ny):
    ds = gdal.Warp('', r, format='MEM', outputBounds=bounds,
                   width=nx, height=ny, resampleAlg='near')
    banda = ds.GetRasterBand(1)
    nodata = banda.GetNoDataValue()
```

```
    a = banda.ReadAsArray().astype(float)
    if nodata is not None:
        a[a == nodata] = np.nan
    ds = None
    return a

ds = gdal.Open(ruta(CAPA_INDICE))
gt = ds.GetGeoTransform()
nx, ny = ds.RasterXSize, ds.RasterYSize
bounds = (gt[0], gt[3] + gt[5]*ny, gt[0] + gt[1]*nx, gt[3])
banda = ds.GetRasterBand(1)
nodata = banda.GetNoDataValue()
indice = banda.ReadAsArray().astype(float)
if nodata is not None:
    indice[indice == nodata] = np.nan
ds = None

valido = (~np.isnan(indice)) & (indice > 0)
px_ha = abs(gt[1] * gt[5]) / 10000

print(f"Territorio evaluado: {valido.sum():,d} píxeles "
      f"({valido.sum()*px_ha:,.2f} ha)")
print(f"Índice: mín {indice[valido].min():.4f} | "
      f"máx {indice[valido].max():.4f} | "
      f"media {indice[valido].mean():.4f}\n")

# --- estadísticos y contribución por criterio ---------------------------------
resultados = []
for etiq, (capa, peso) in PESOS.items():
    a = leer_alineado(ruta(capa), bounds, nx, ny)
    v = a[valido]
    v = v[~np.isnan(v)]
    resultados.append((etiq, peso, v.mean(), v.std(), peso * v.std()))

total_c = sum(r[4] for r in resultados)
```

```
total_v = sum(r[4] ** 2 for r in resultados)


print("COMPORTAMIENTO EFECTIVO DE LOS CRITERIOS")
print(f"{'criterio':<26}{'peso':>7}{'media':>9}{'desv':>9}"
      f"{'contrib.':>11}{'varianza':>11}")
print("-" * 73)
for etiq, peso, media, desv, contrib in sorted(resultados, key=lambda r: -r[4]):
    print(f"{etiq:<26}{peso:>7.2f}{media:>9.4f}{desv:>9.4f}"
          f"{contrib/total_c*100:>10.1f}%{contrib**2/total_v*100:>10.2f}%")


# --- compresión de escala en los criterios de distancia ----------------------
print("\nCOMPRESIÓN DE ESCALA EN LOS CRITERIOS DE DISTANCIA")
print(f"{'capa':<32}{'denominador':>13}{'máx. evaluable':>16}"
      f"{'mediana':>10}{'escala':>9}")
print("-" * 80)
for capa, denominador in DISTANCIAS.items():
    encontrada = QgsProject.instance().mapLayersByName(capa)
    if not encontrada:
        print(f"{capa:<32}   (no cargada en el proyecto)")
        continue
    a = leer_alineado(encontrada[0].source(), bounds, nx, ny)
    v = a[valido]
    v = v[~np.isnan(v)]
    print(f"{capa:<32}{denominador:>13,.1f}{v.max():>16,.1f}"
          f"{np.median(v):>10,.1f}{v.max()/denominador*100:>8.1f}%")
```

12. ANEXO INFORMES PVSYST

PVSYST
PHOTOVOLTAIC
SOFTWARE

PVsyst TRIAL

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: Análisis APV Alta01

Variant: Simulación Idoneidad Alta

Sheds, single array

System power: 99.0 kWp

Idoneidad Alata01 - Spain

Author

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:30
with V8.1.4

Project summary

Geographical Site
Idoneidad Alata01
Spain

Situation

Latitude	40.2387 °(N)
Longitude	-4.0051 °(W)
Altitude	598 m
Time zone	UTC+1

Project settings
Albedo 0.20

Weather data
Idoneidad Alata01
PVGIS api TMY

System summary

Grid-Connected System
Sheds, single array

Orientation #1
Fixed plane
Tilt/Azimuth 20 / 0 °

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules	180 units
Pnom total	99.0 kWp

Inverters

Nb. of units	1 unit
Total power	90 kWac
Pnom ratio	1.10

Results summary

Simulation step Hourly

Produced Energy	175737 kWh/year	Specific production	1775 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	85.46 %

Table of contents

Project and results summary 2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses 3
Near shading definition - Iso-shadings diagram 5
Main results 6
Loss diagram 7
Predef. graphs 8
Single-line diagram 11

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:30
with V8.1.4

General parameters

Grid-Connected System — **Sheds, single array**

Simulation step
Hourly

Orientation #1

Fixed plane

Tilt/Azimuth	20 / 0 °

Sheds configuration

Nb. of sheds	10 units
Single array	

Shading limit angle

Limit profile angle	4.6 °

Sizes

Sheds spacing	12.0 m
Sensitive width	2.29 m
GCR Shading	19.2 %
Top inactive band	0.02 m
Bottom inactive band	0.02 m

Models used

Transposition	Perez
Diffuse	Imported
Circumsolar	separate

Horizon
Free Horizon

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer	Generic
Model	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	550 Wp
Number of PV modules	180 units
Nominal (STC)	99.0 kWp
Modules	10 units x 18 In series
At operating cond. (50°C)	
Pmpp	90.8 kWp
U mpp	680 V
I mpp	134 A

Inverter

Manufacturer	Generic
Model	90 kWac inverter (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Total power	90.0 kWac
Operating voltage	180-1000 V
Pnom ratio (DC:AC)	1.10
Power sharing within this inverter	

Total PV power

Nominal (STC)	99 kWp
Total	180 modules
Module area	465 m²
Cell area	429 m²

Total inverter power

Total power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Pnom ratio	1.10

Array losses

Array Soiling Losses

Loss Fraction	2.5 %

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance	
Uc (const)	29.0 W/m²K
Uv (wind)	0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses

Global array res.	84 mΩ
Loss Fraction	1.50 % at STC

LID - Light Induced Degradation

Loss Fraction	1.50 %

Module Quality Loss

Loss Fraction	-0.38 %

Module mismatch losses

Loss Fraction	2.00 % at MPP

Strings Mismatch loss

Loss Fraction	0.10 %

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:30
with V8.1.4

Array losses

IAM loss factor

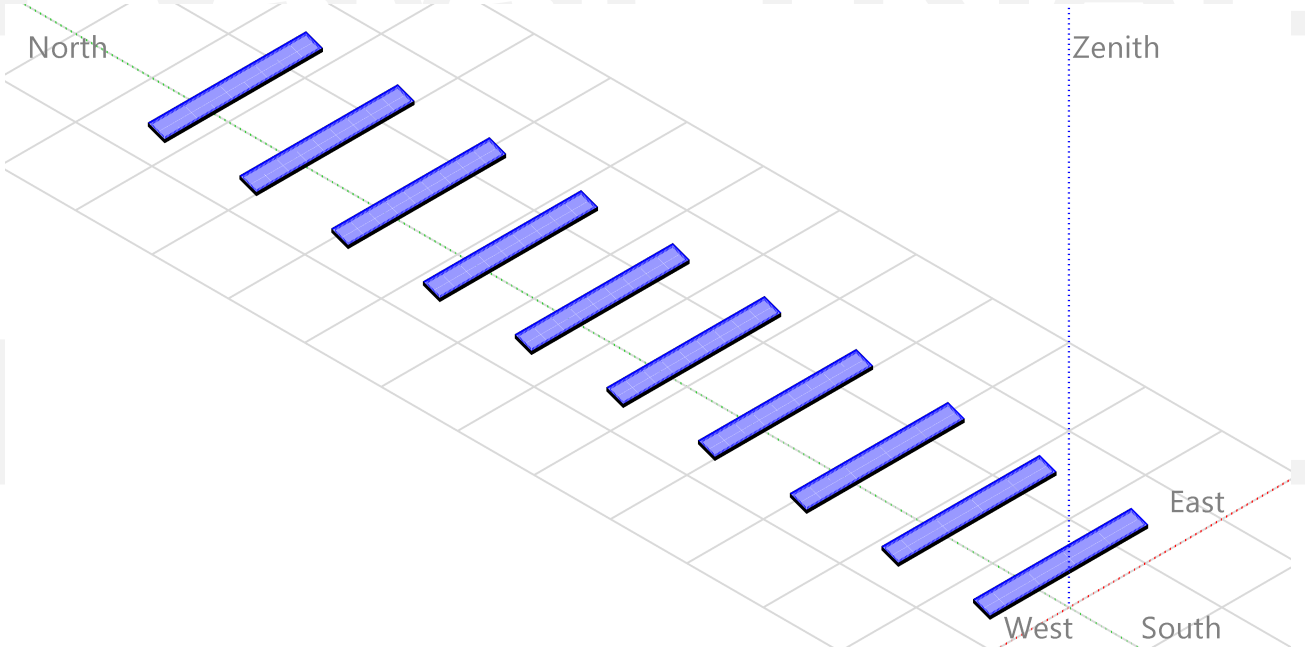
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.963	0.892	0.814	0.679	0.438	0.000

PVsyst TRIAL

Near shadings parameter

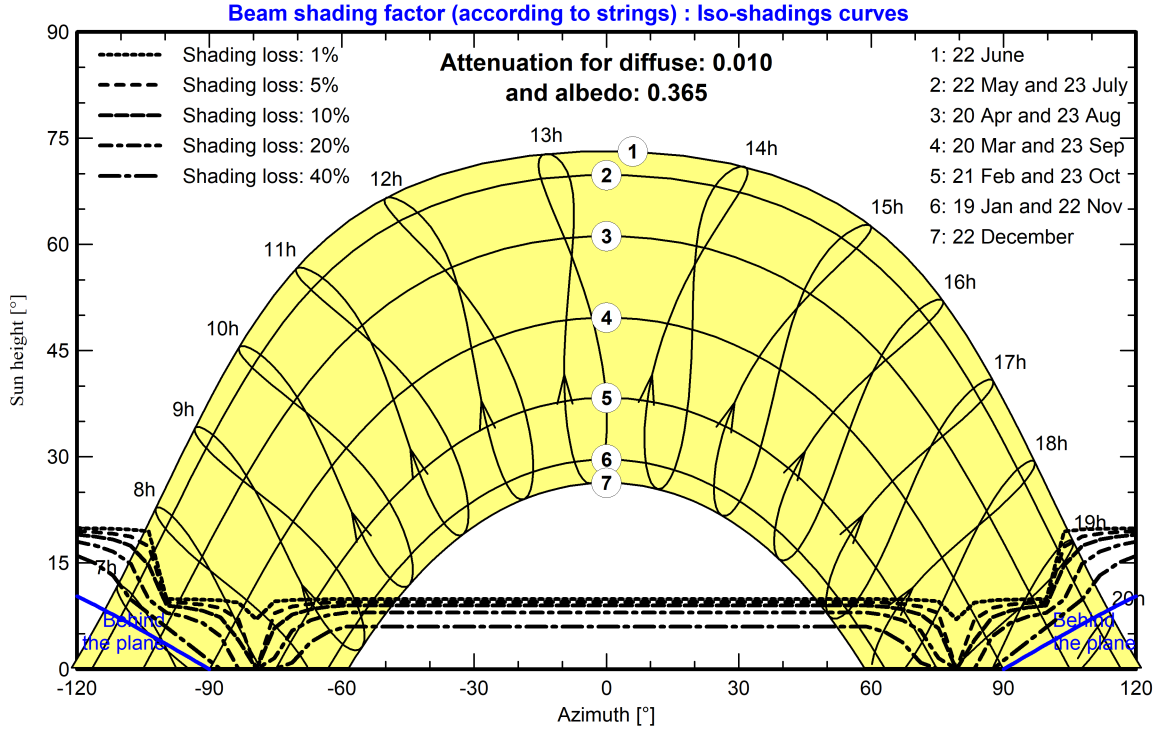
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1 - Fixed plane, Tilts/azimuths: 20°/ 0°

Beam shading factor (according to strings) : Iso-shadings curves



PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:30
with V8.1.4

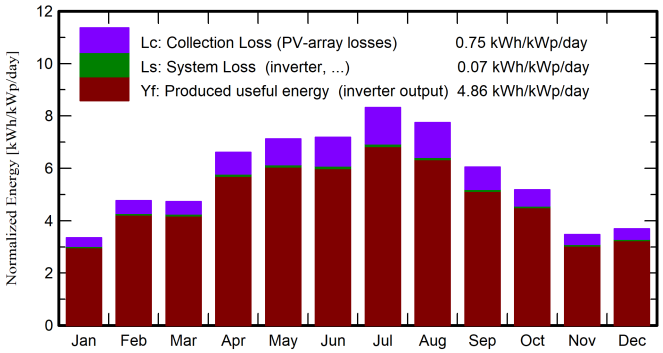
Main results

Simulation step
Hourly

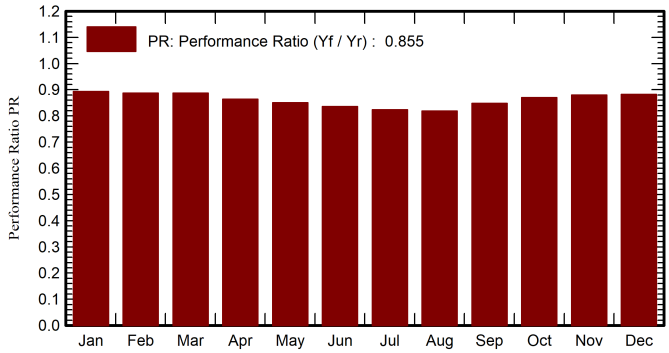
System Production

Produced Energy	175737 kWh/year	Specific production	1775 kWh/kWp/year
		Perf. Ratio PR	85.46 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	69.6	27.04	3.87	103.8	97.9	9319	9168	0.893
February	96.2	28.65	6.63	133.3	126.5	11887	11714	0.888
March	125.0	52.34	7.49	146.7	139.3	13086	12879	0.887
April	181.4	60.85	12.46	198.3	188.2	17203	16951	0.864
May	214.6	76.42	17.95	220.9	209.7	18858	18588	0.850
June	217.9	73.69	21.23	215.6	204.0	18111	17835	0.836
July	255.5	58.85	25.36	257.8	244.7	21318	21019	0.823
August	223.7	57.51	28.10	240.2	228.4	19737	19461	0.818
September	155.3	51.24	20.14	181.6	172.7	15477	15251	0.848
October	122.5	39.23	13.43	160.6	152.5	14031	13825	0.869
November	72.9	30.77	10.91	104.1	98.5	9208	9059	0.879
December	70.2	21.10	5.42	114.3	107.7	10137	9985	0.882
Year	1804.9	577.69	14.46	2077.1	1970.2	178372	175737	0.855

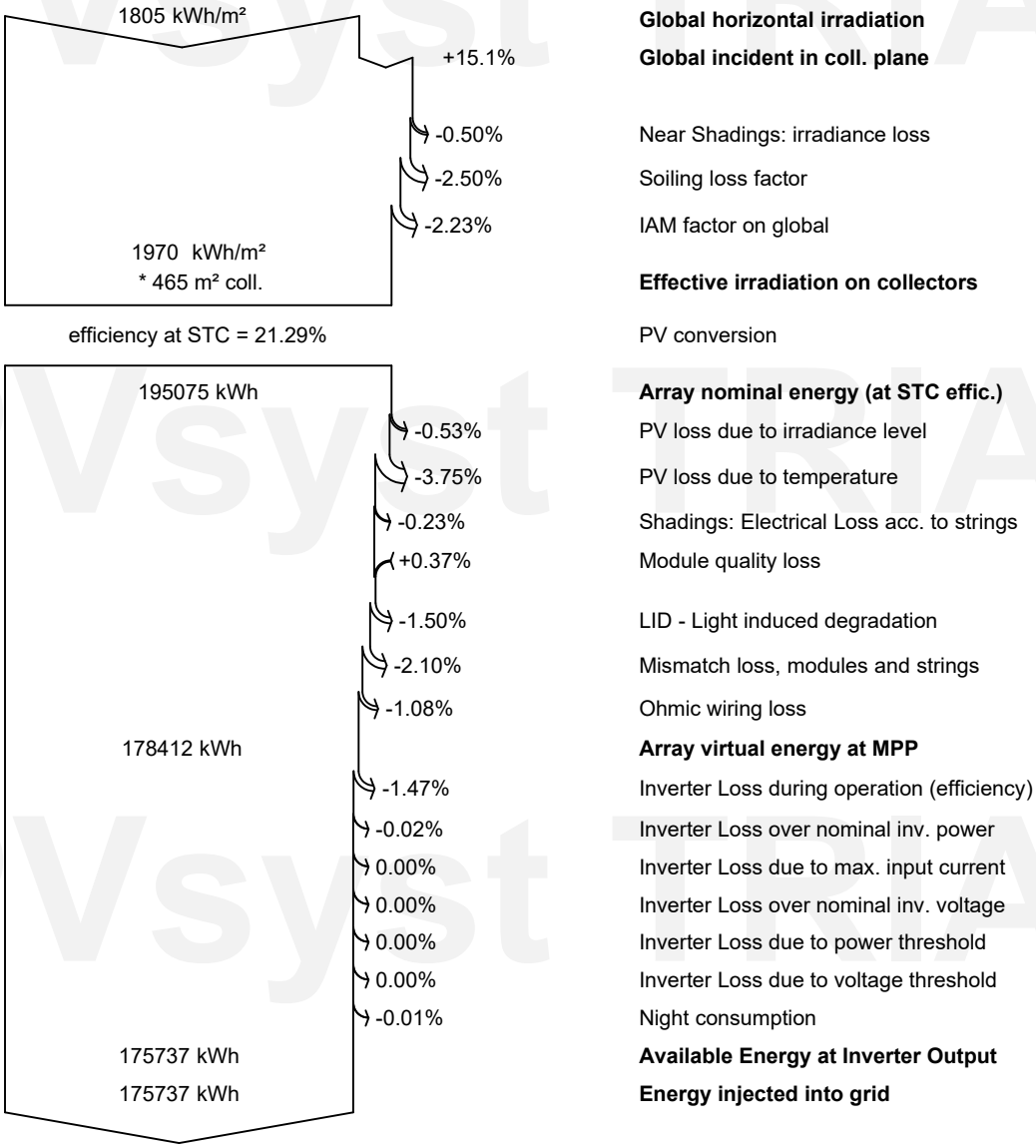
Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:30
with V8.1.4

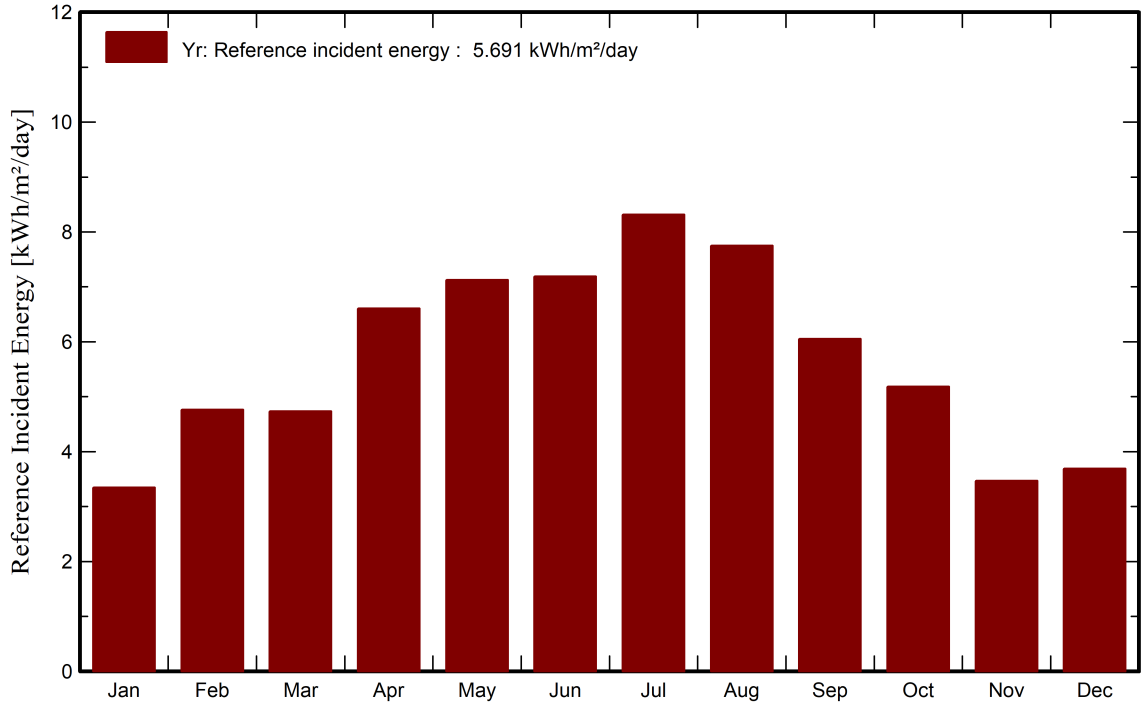
Loss diagram



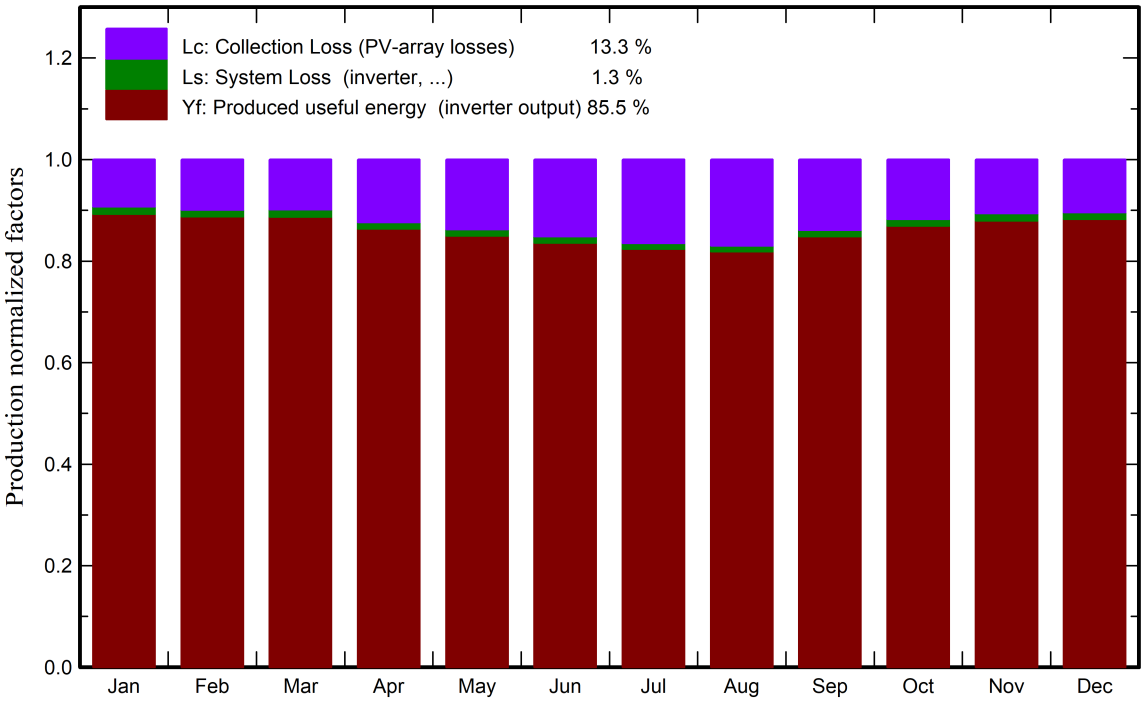
PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:30
with V8.1.4

Predef. graphs

Reference Incident Energy in Collector Plane

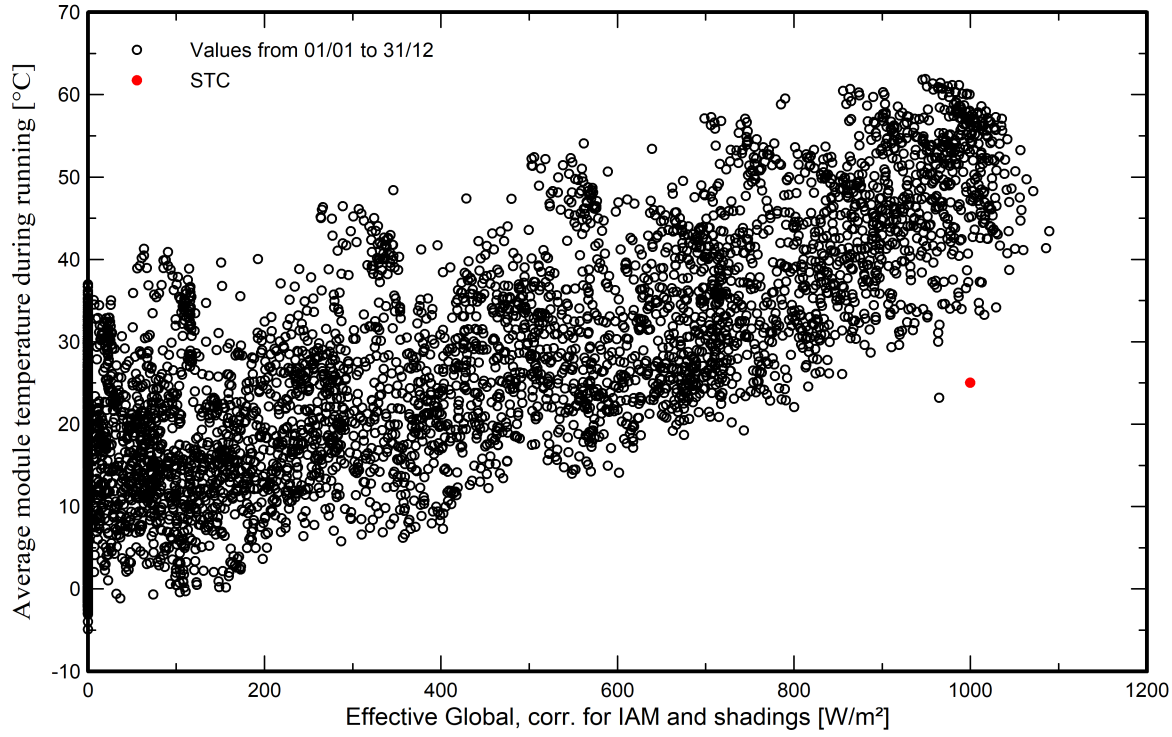


Normalized Production and Loss Factors

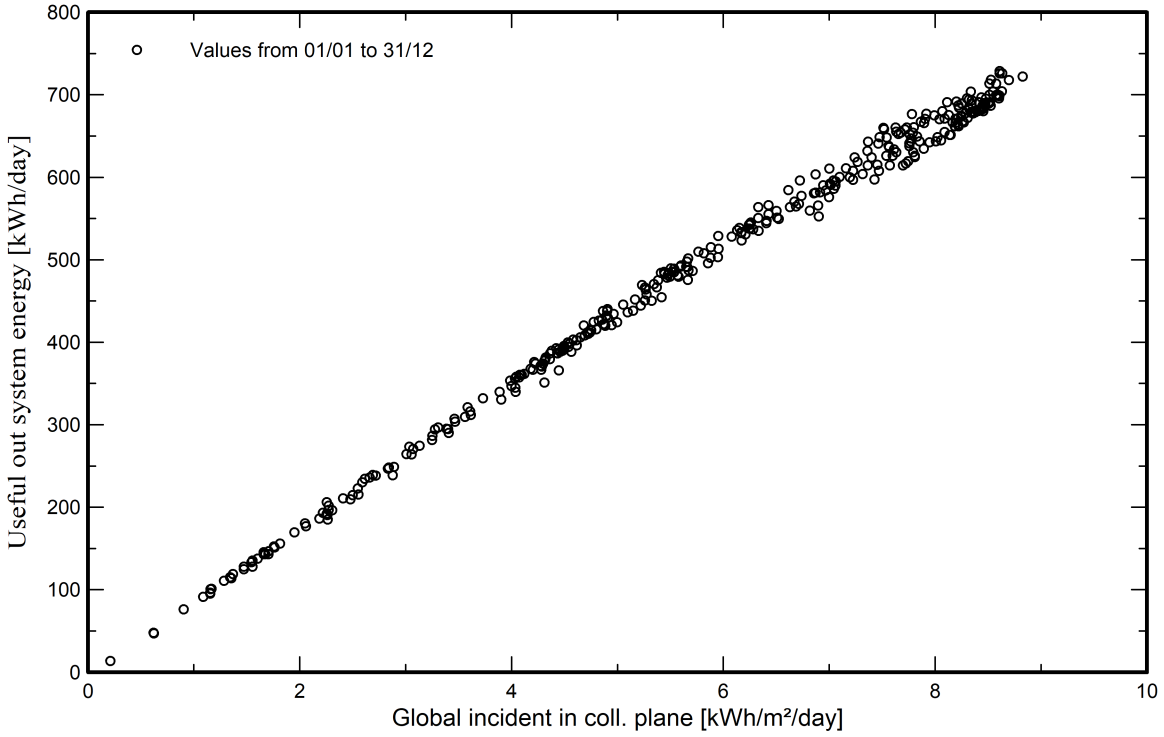


Predef. graphs

Array Temperature vs. Effective Irradiance

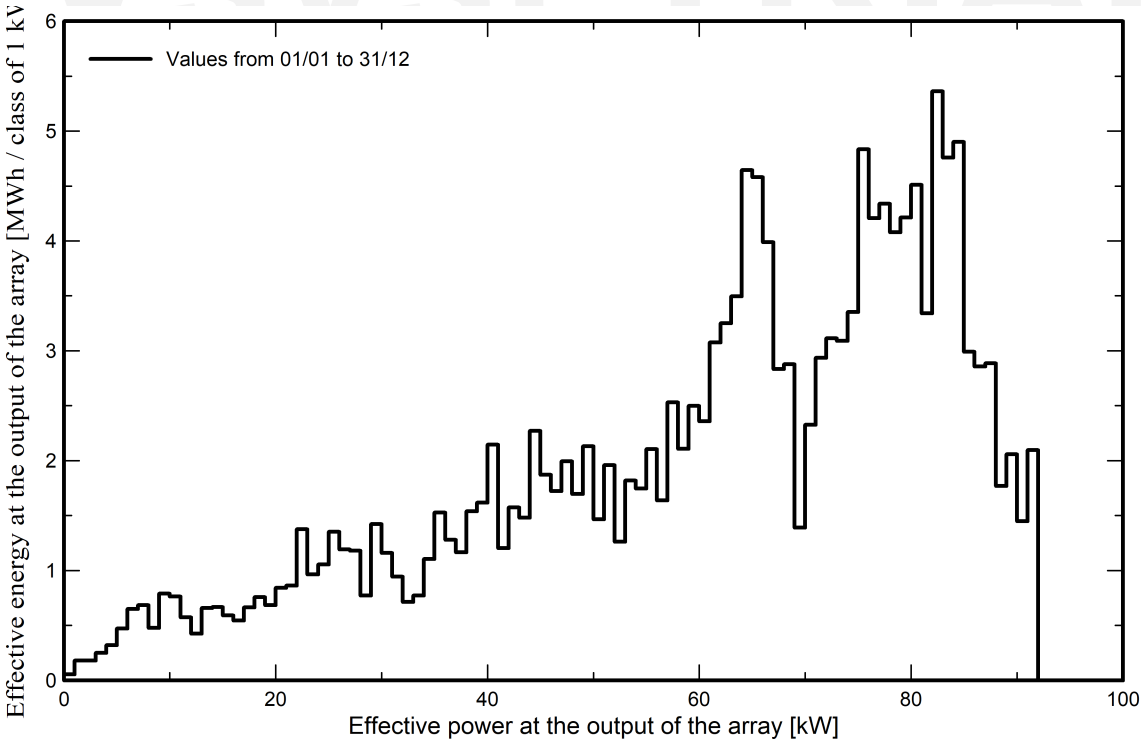


Daily Input/Output diagram

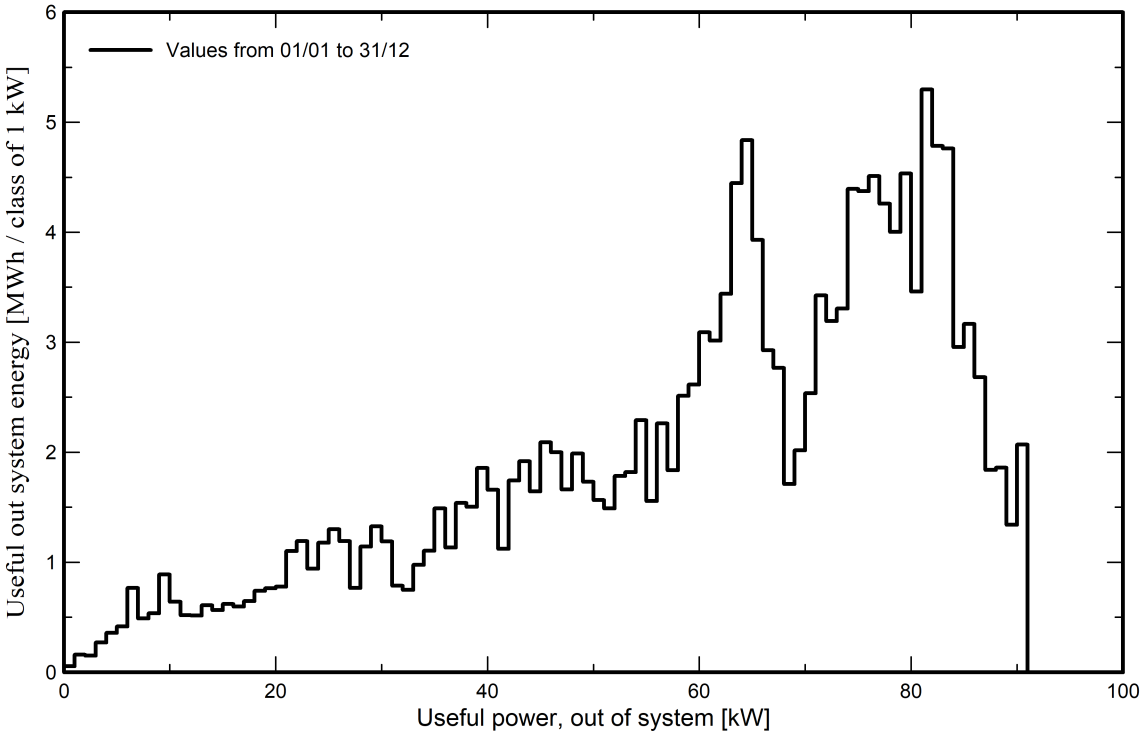


Predef. graphs

Array Power Distribution

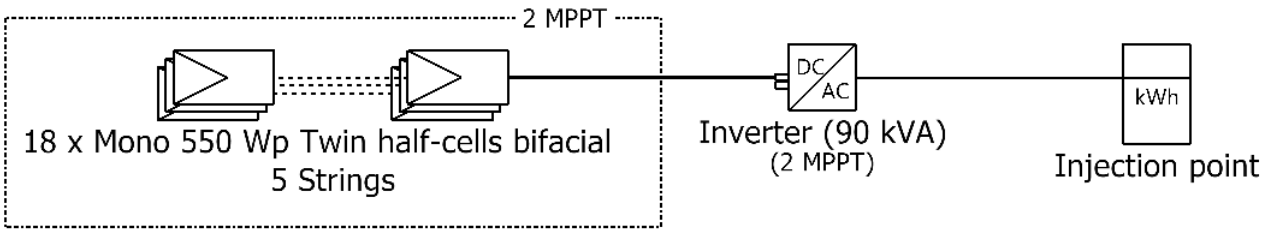


System Output Power Distribution



Single-line diagram

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:30
with V8.1.4



PV module	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial
Inverter	90 kWac inverter
String	18 x Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial

	Análisis APV Alta01	
	VC1 : Simulación Idoneidad Alta	01/08/26

PVsyst V8.1.4

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: Análisis APV Media01

Variant: Simulación Idoneidad Alta

Sheds, single array

System power: 99.0 kWp

Idoneidad Media01 - Spain

Author

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:34
with V8.1.4

Project summary

Geographical Site
Idoneidad Media01
Spain

Situation

Latitude	40.1708 °(N)
Longitude	-3.4784 °(W)
Altitude	524 m
Time zone	UTC+1

Project settings
Albedo 0.20

Weather data
Idoneidad Media01
PVGIS api TMY

System summary

Grid-Connected System
Sheds, single array

Orientation #1
Fixed plane
Tilt/Azimuth 20 / 0 °

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules	180 units
Pnom total	99.0 kWp

Inverters

Nb. of units	1 unit
Total power	90 kWac
Pnom ratio	1.10

Results summary

Simulation step Hourly

Produced Energy	175137 kWh/year	Specific production	1769 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	85.27 %

Table of contents

Project and results summary 2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses 3
Near shading definition - Iso-shadings diagram 5
Main results 6
Loss diagram 7
Predef. graphs 8
Single-line diagram 11

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:34
with V8.1.4

General parameters

Grid-Connected System — **Sheds, single array**

Simulation step
Hourly

Orientation #1

Fixed plane

Tilt/Azimuth	20 / 0 °

Sheds configuration

Nb. of sheds	10 units
Single array	

Shading limit angle

Limit profile angle	4.6 °

Sizes

Sheds spacing	12.0 m
Sensitive width	2.29 m
GCR Shading	19.2 %
Top inactive band	0.02 m
Bottom inactive band	0.02 m

Models used

Transposition	Perez
Diffuse	Imported
Circumsolar	separate

Horizon
Free Horizon

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer	Generic
Model	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	550 Wp
Number of PV modules	180 units
Nominal (STC)	99.0 kWp
Modules	10 units x 18 In series
At operating cond. (50°C)	
Pmpp	90.8 kWp
U mpp	680 V
I mpp	134 A

Inverter

Manufacturer	Generic
Model	90 kWac inverter (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Total power	90.0 kWac
Operating voltage	180-1000 V
Pnom ratio (DC:AC)	1.10
Power sharing within this inverter	

Total PV power

Nominal (STC)	99 kWp
Total	180 modules
Module area	465 m²
Cell area	429 m²

Total inverter power

Total power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Pnom ratio	1.10

Array losses

Array Soiling Losses

Loss Fraction	2.5 %

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance	
Uc (const)	29.0 W/m²K
Uv (wind)	0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses

Global array res.	84 mΩ
Loss Fraction	1.50 % at STC

LID - Light Induced Degradation

Loss Fraction	1.50 %

Module Quality Loss

Loss Fraction	-0.38 %

Module mismatch losses

Loss Fraction	2.00 % at MPP

Strings Mismatch loss

Loss Fraction	0.10 %

Array losses

IAM loss factor

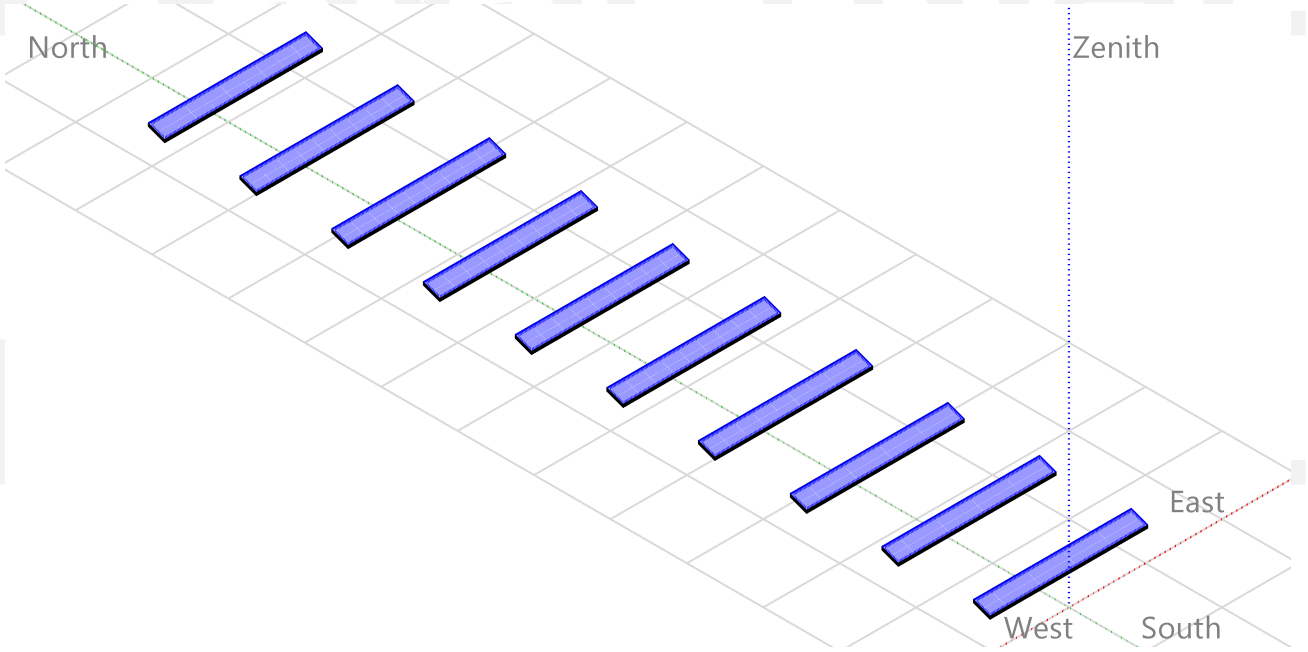
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.963	0.892	0.814	0.679	0.438	0.000

PVsyst TRIAL

Near shadings parameter

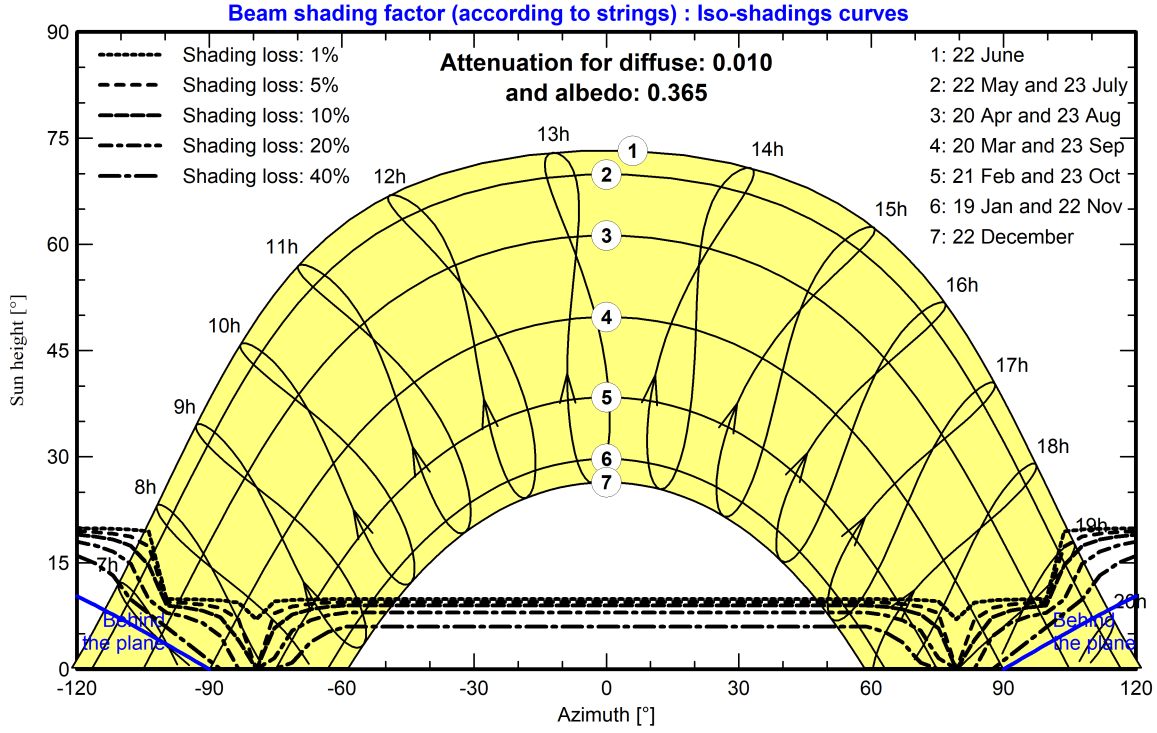
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1 - Fixed plane, Tilts/azimuths: 20°/ 0°

Beam shading factor (according to strings) : Iso-shadings curves



PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:34
with V8.1.4

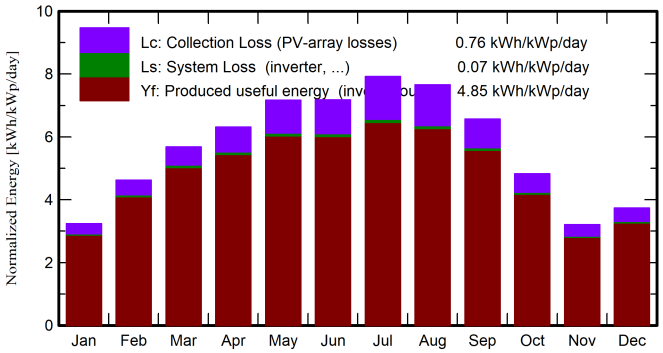
Main results

Simulation step
Hourly

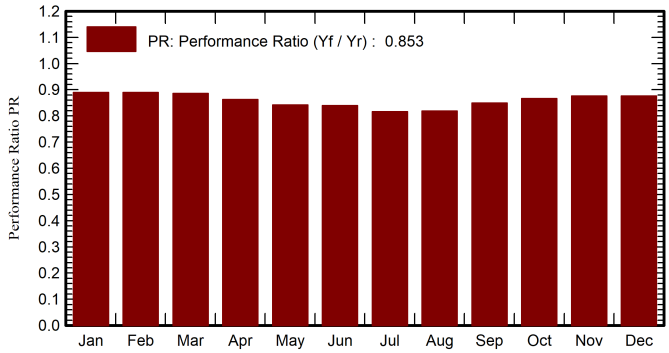
System Production

Produced Energy	175137 kWh/year	Specific production	1769 kWh/kWp/year
		Perf. Ratio PR	85.27 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	67.8	26.13	5.24	100.4	94.8	8984	8835	0.889
February	95.1	29.56	6.27	129.3	122.7	11559	11387	0.889
March	146.6	56.45	8.19	176.3	167.3	15675	15451	0.885
April	174.2	63.75	13.77	189.4	179.7	16411	16167	0.862
May	218.1	72.71	18.70	222.3	210.5	18812	18537	0.842
June	216.3	70.35	20.18	215.3	204.2	18157	17879	0.839
July	243.3	63.05	27.63	245.5	233.1	20146	19853	0.817
August	221.3	56.74	27.93	237.4	225.7	19523	19250	0.819
September	168.2	50.86	19.95	197.1	187.8	16805	16566	0.849
October	116.1	44.79	15.64	149.6	142.0	13026	12831	0.867
November	68.7	31.65	11.11	96.1	90.8	8484	8339	0.876
December	72.2	23.46	8.05	115.8	109.3	10197	10041	0.876
Year	1807.8	589.51	15.28	2074.6	1968.0	177778	175137	0.853

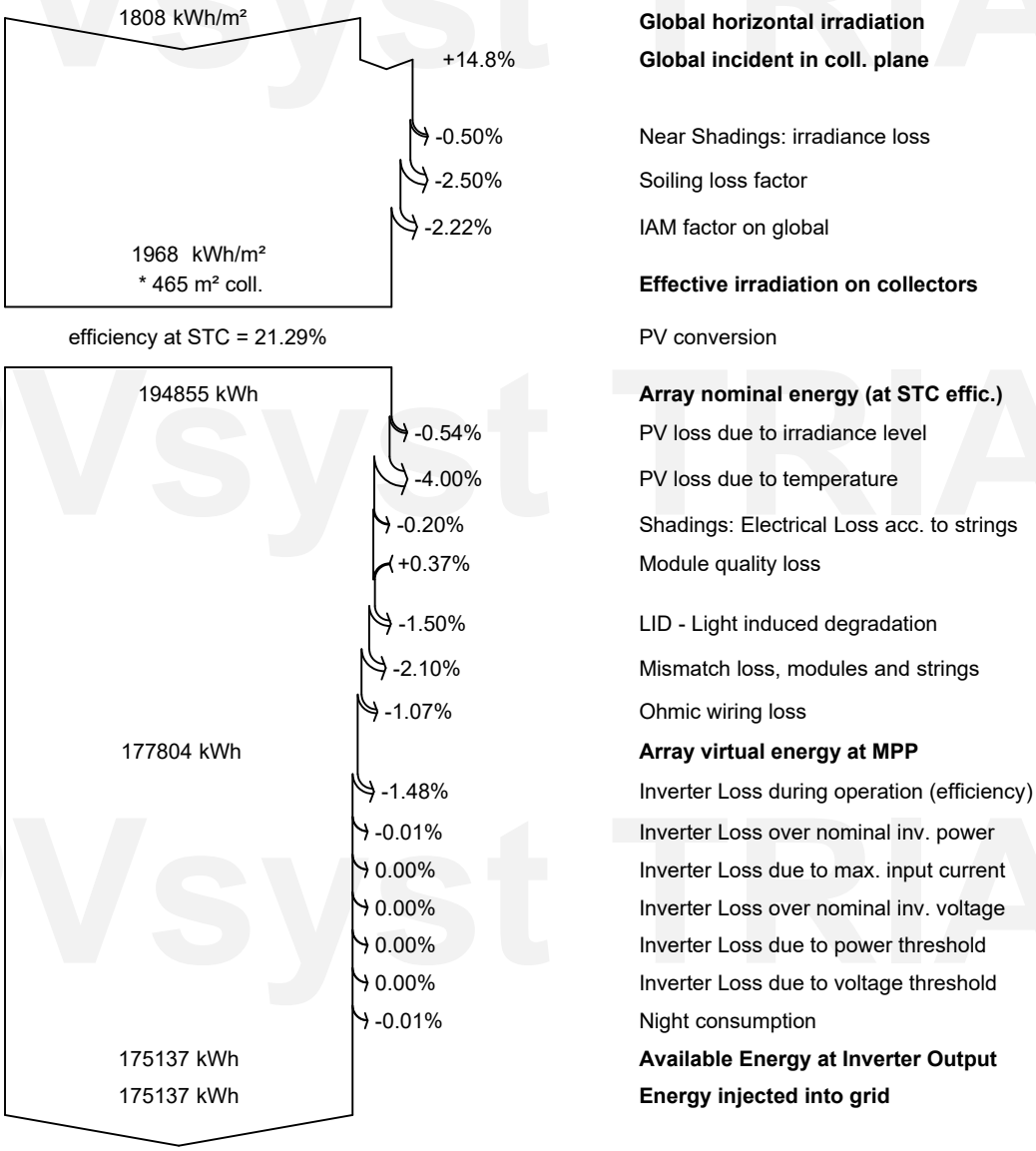
Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:34
with V8.1.4

Loss diagram

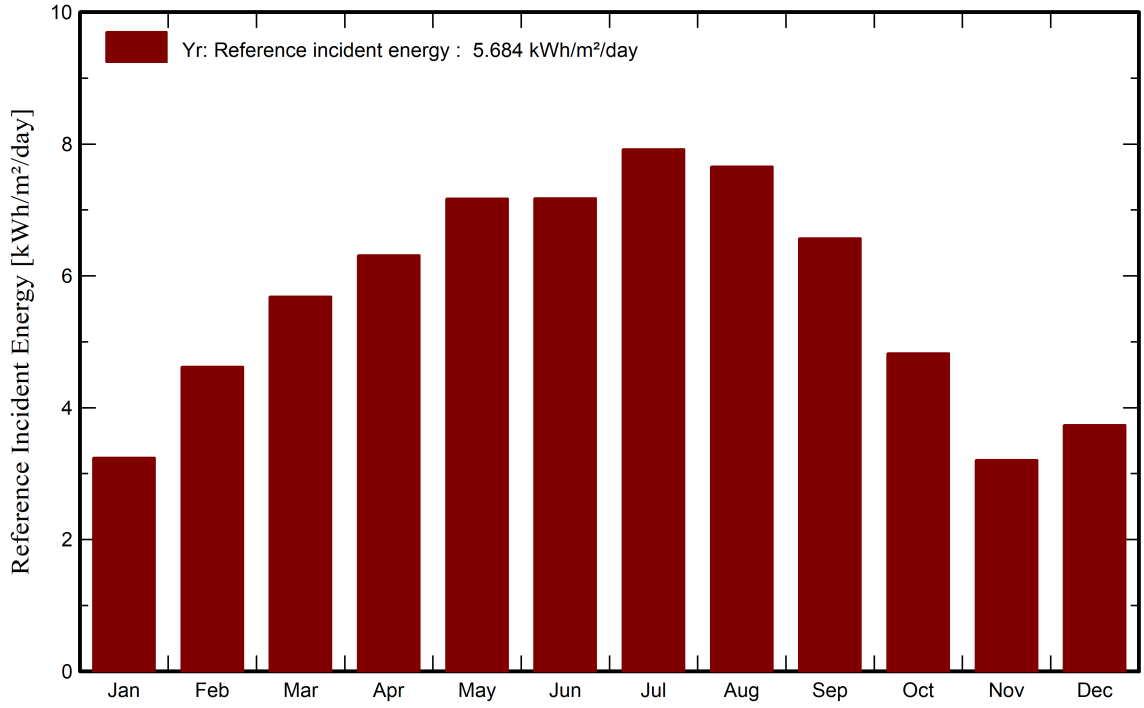


PVsyst TRIAL

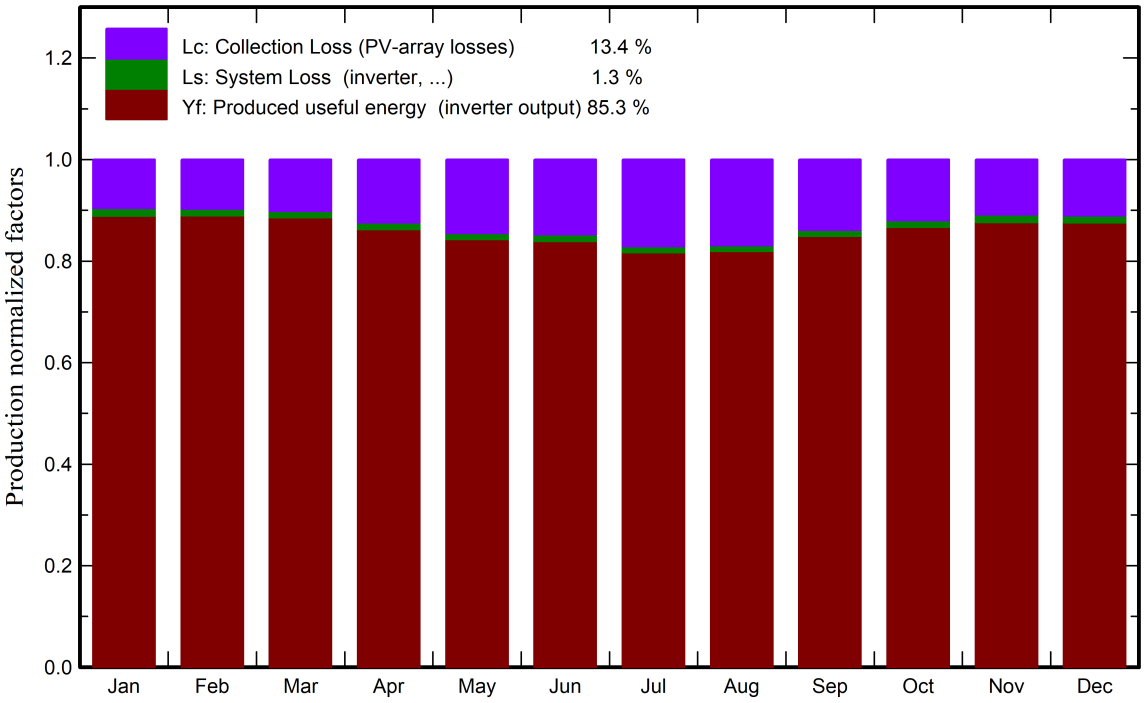
PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:34
with V8.1.4

Predef. graphs

Reference Incident Energy in Collector Plane



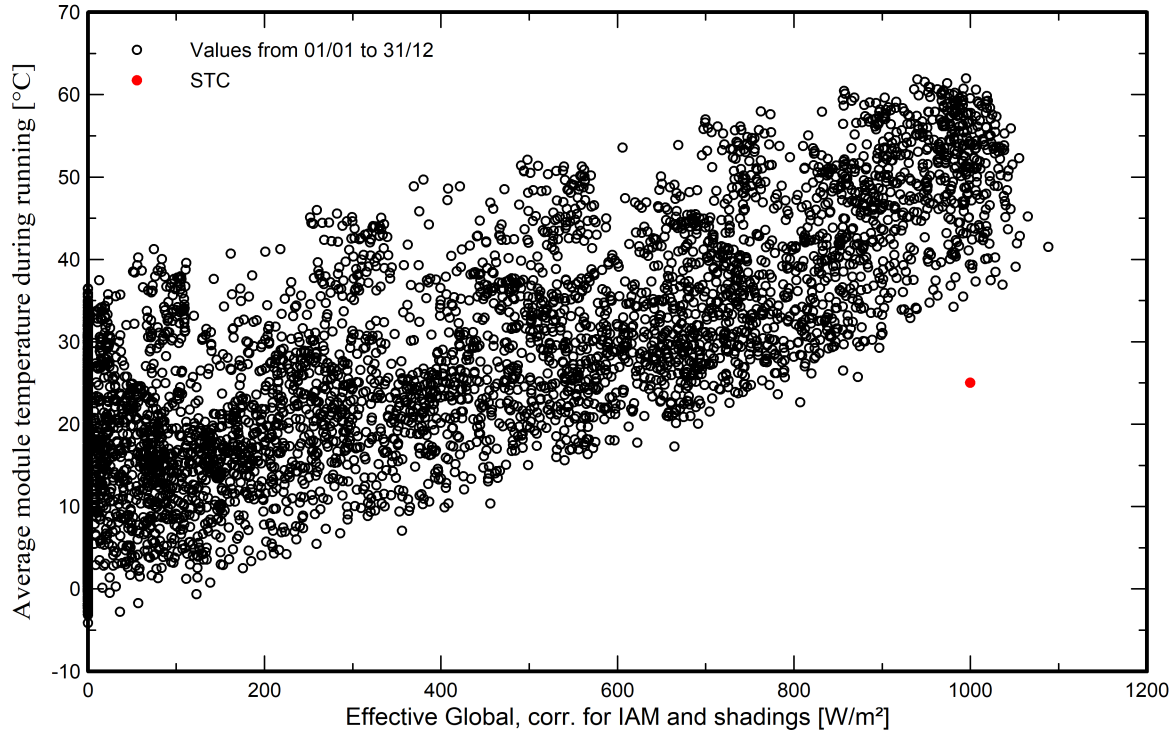
Normalized Production and Loss Factors



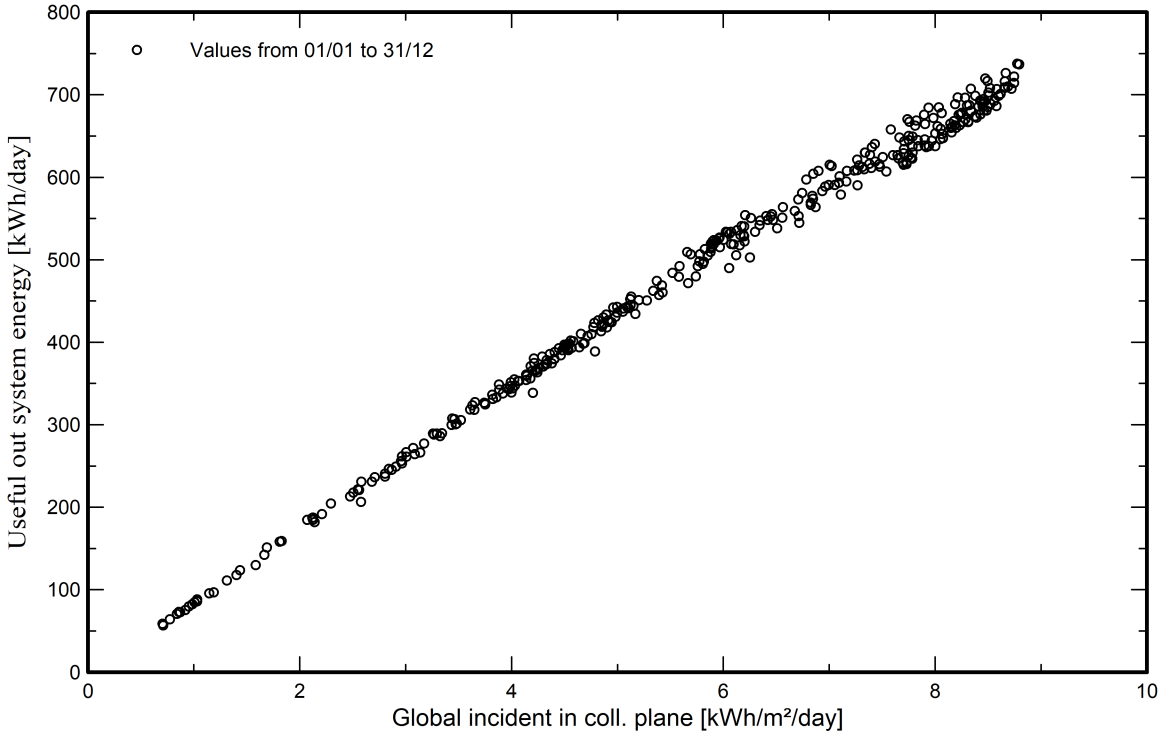
PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:34
with V8.1.4

Predef. graphs

Array Temperature vs. Effective Irradiance



Daily Input/Output diagram

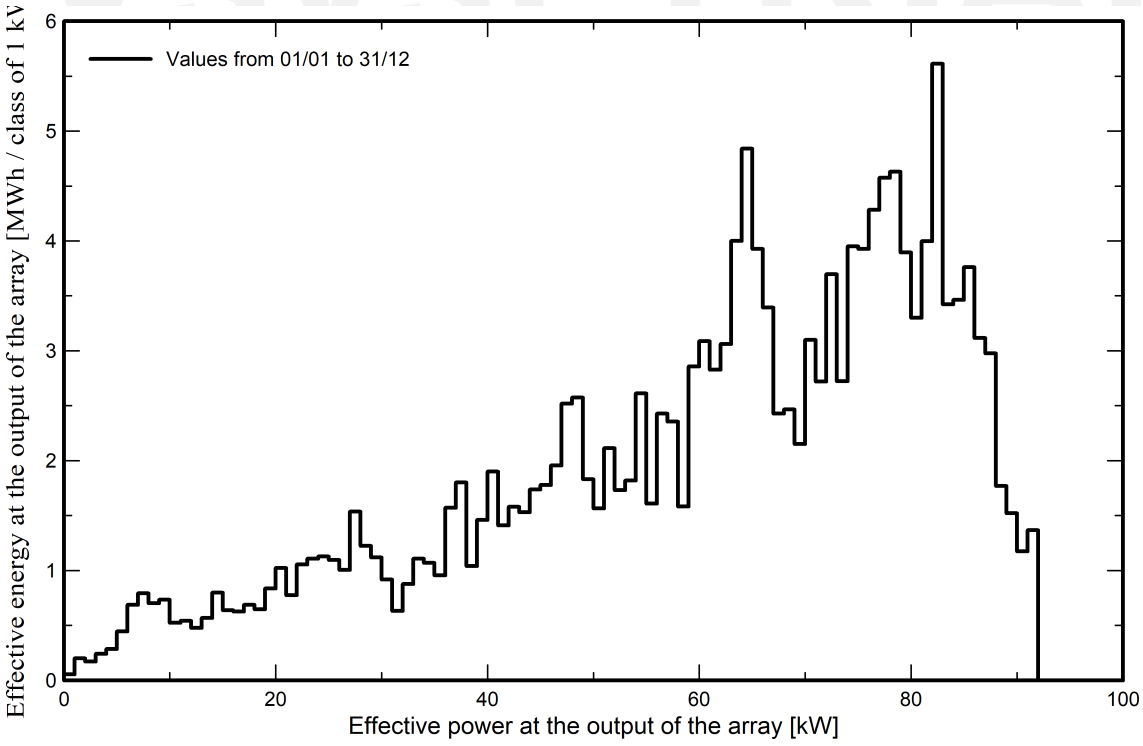


PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:34
with V8.1.4

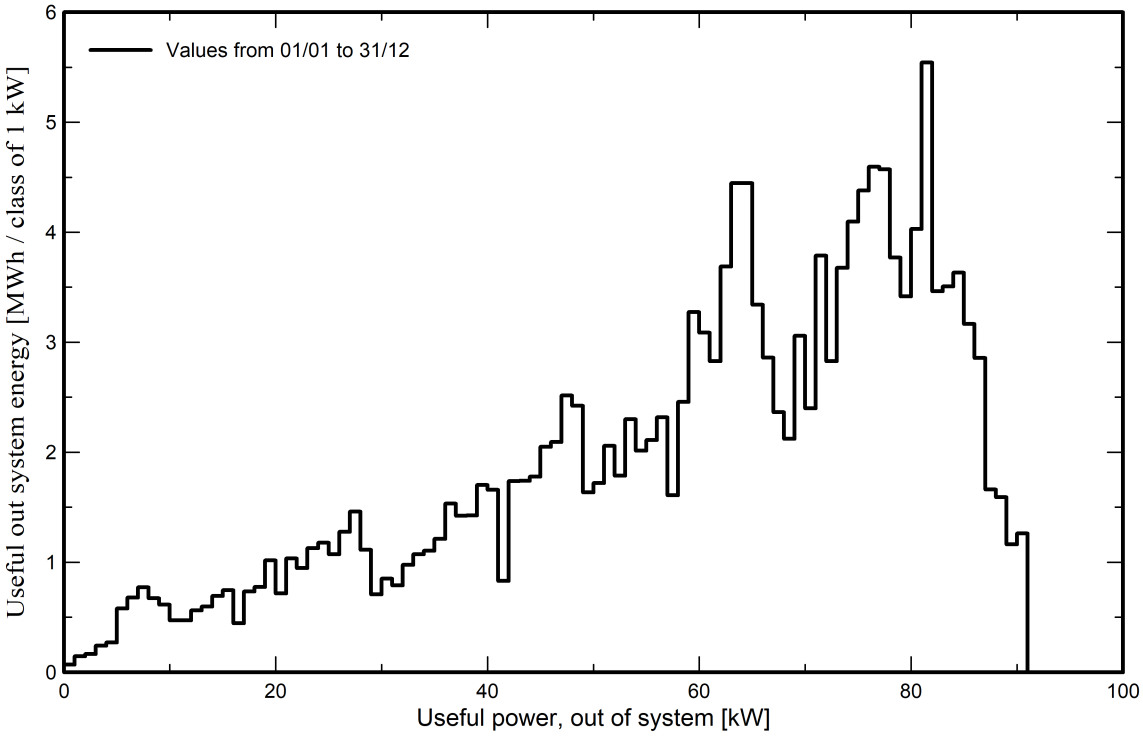
PVsyst TRIAL

Predef. graphs

Array Power Distribution

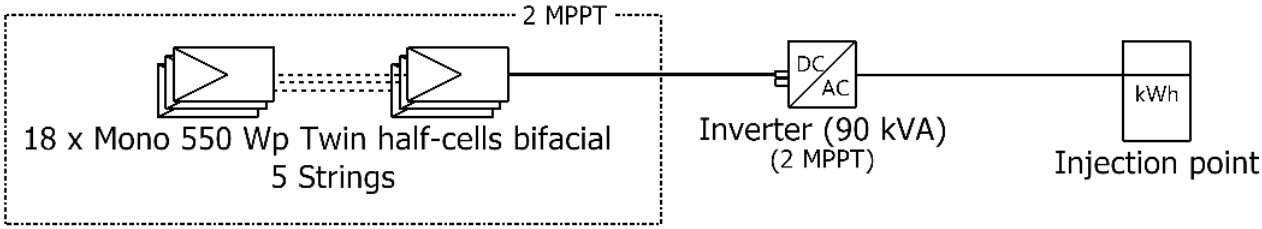


System Output Power Distribution



Single-line diagram

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:34
with V8.1.4



PV module	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial
Inverter	90 kWac inverter
String	18 x Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial

	Análisis APV Media01	
	VC1 : Simulación Idoneidad Alta	01/08/26

PVSYST
PHOTOVOLTAIC
SOFTWARE

PVsyst TRIAL

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: Análisis APV

Variant: Simulación Idoneidad Muy Alta

Sheds, single array

System power: 99.0 kWp

APV Madrid Muy Alta - Spain

Author

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
30/07/26 22:11
with V8.1.4

Project summary

Geographical Site
APV Madrid Muy Alta
España

Situation

Latitude	40.2384 °(N)
Longitude	-4.0009 °(W)
Altitude	605 m
Time zone	UTC+1

Project settings
Albedo 0.20

Weather data
APV Madrid Muy Alta
PVGIS api TMY

System summary

Grid-Connected System
Sheds, single array

Orientation #1
Fixed plane
Tilt/Azimuth 20 / 0 °

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules	180 units
Pnom total	99.0 kWp

Inverters

Nb. of units	1 unit
Total power	90 kWac
Pnom ratio	1.10

Results summary

Simulation step Hourly

Produced Energy	175739 kWh/year	Specific production	1775 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	85.46 %

Table of contents

Project and results summary 2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses 3
Near shading definition - Iso-shadings diagram 5
Main results 6
Loss diagram 7
Predef. graphs 8
Single-line diagram 11

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
30/07/26 22:11
with V8.1.4

General parameters

Grid-Connected System

Sheds, single array

Simulation step
Hourly

Orientation #1

Fixed plane

Tilt/Azimuth	20 / 0 °

Sheds configuration

Nb. of sheds	10 units
Single array	

Shading limit angle

Limit profile angle	4.6 °

Sizes

Sheds spacing	12.0 m
Sensitive width	2.29 m
GCR Shading	19.2 %
Top inactive band	0.02 m
Bottom inactive band	0.02 m

Models used

Transposition	Perez
Diffuse	Imported
Circumsolar	separate

Horizon
Free Horizon

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer	Generic
Model	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	550 Wp
Number of PV modules	180 units
Nominal (STC)	99.0 kWp
Modules	10 units x 18 In series
At operating cond. (50°C)	
Pmpp	90.8 kWp
U mpp	680 V
I mpp	134 A

Inverter

Manufacturer	Generic
Model	90 kWac inverter (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Total power	90.0 kWac
Operating voltage	180-1000 V
Pnom ratio (DC:AC)	1.10
Power sharing within this inverter	

Total PV power

Nominal (STC)	99 kWp
Total	180 modules
Module area	465 m²
Cell area	429 m²

Total inverter power

Total power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Pnom ratio	1.10

Array losses

Array Soiling Losses

Loss Fraction	2.5 %

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance	
Uc (const)	29.0 W/m²K
Uv (wind)	0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses

Global array res.	84 mΩ
Loss Fraction	1.50 % at STC

LID - Light Induced Degradation

Loss Fraction	1.50 %

Module Quality Loss

Loss Fraction	-0.38 %

Module mismatch losses

Loss Fraction	2.00 % at MPP

Strings Mismatch loss

Loss Fraction	0.10 %

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
30/07/26 22:11
with V8.1.4

Array losses

IAM loss factor

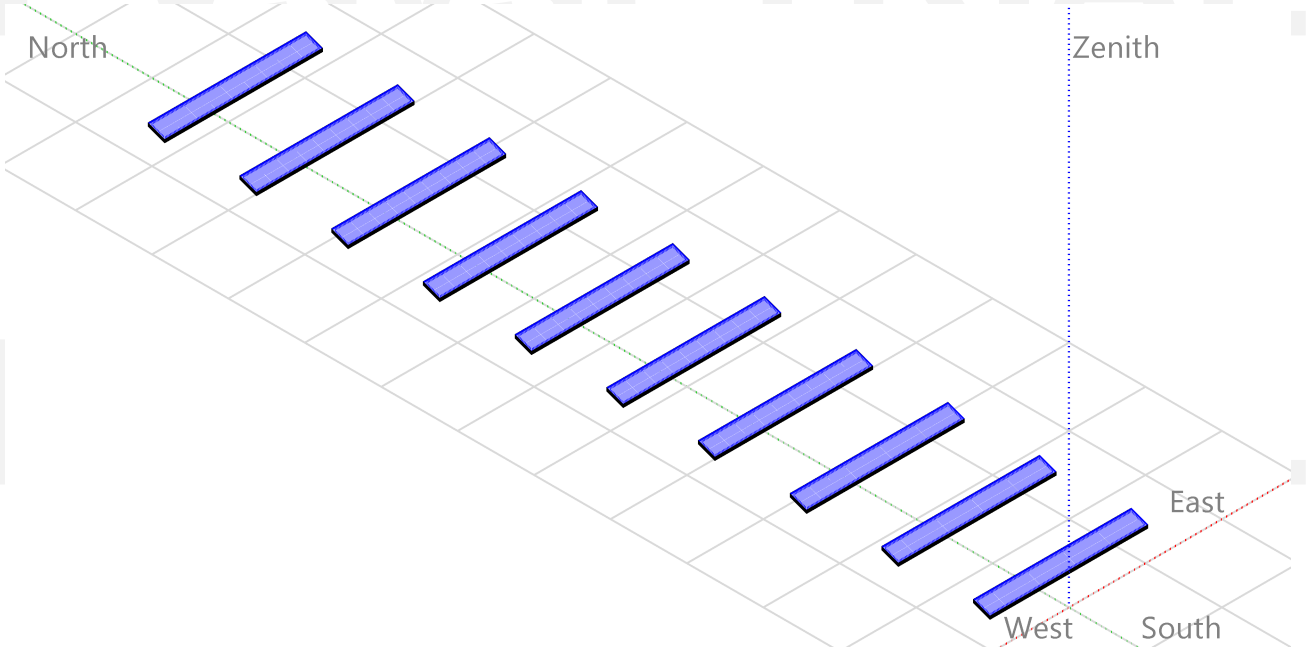
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.963	0.892	0.814	0.679	0.438	0.000

PVsyst TRIAL

Near shadings parameter

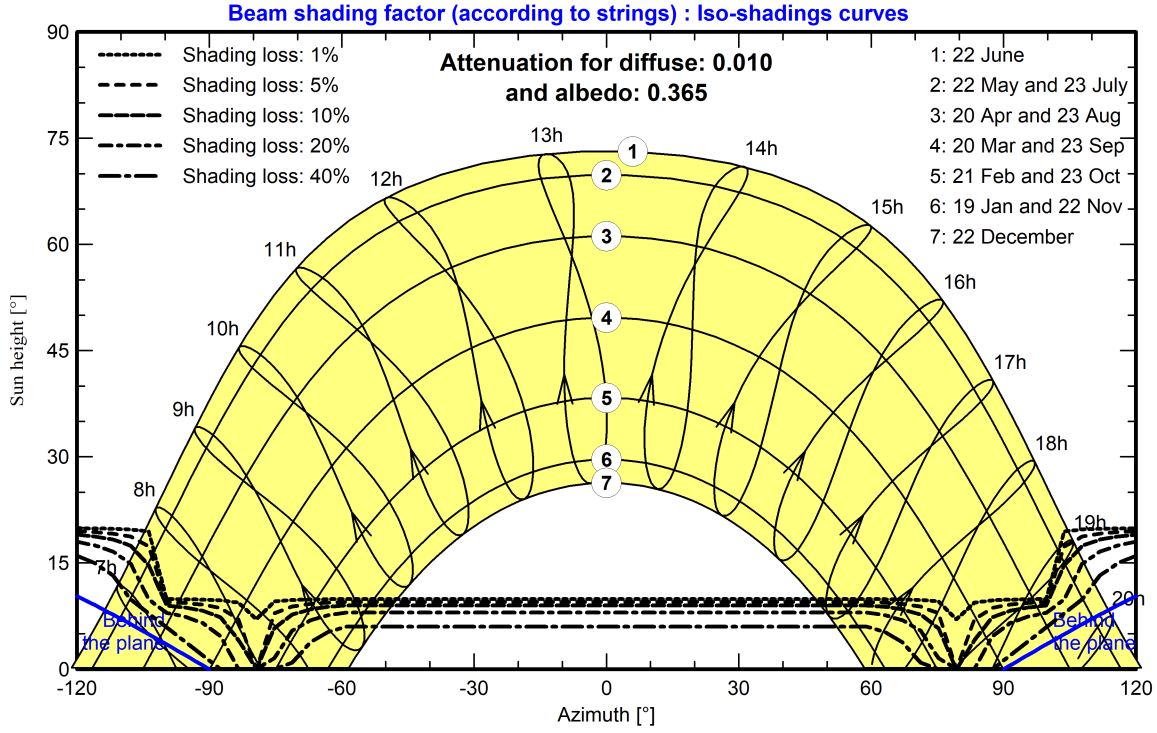
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1 - Fixed plane, Tilts/azimuths: 20°/ 0°

Beam shading factor (according to strings) : Iso-shadings curves



PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
30/07/26 22:11
with V8.1.4

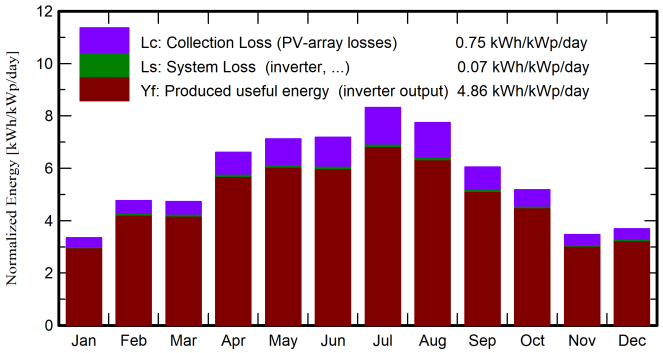
Main results

Simulation step
Hourly

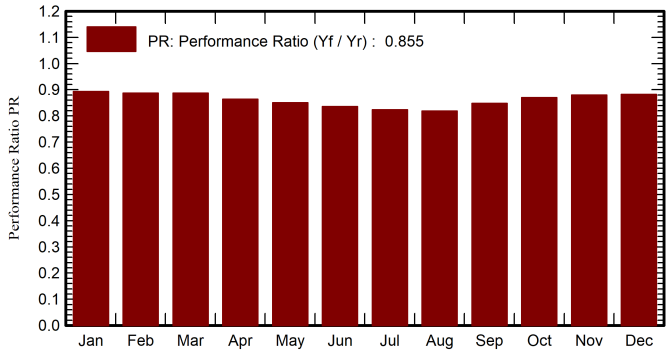
System Production

Produced Energy	175739 kWh/year	Specific production	1775 kWh/kWp/year
		Perf. Ratio PR	85.46 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	69.6	27.04	3.87	103.8	97.9	9319	9168	0.893
February	96.2	28.65	6.63	133.3	126.5	11888	11714	0.888
March	125.0	52.34	7.49	146.7	139.3	13086	12879	0.887
April	181.4	60.85	12.46	198.3	188.2	17203	16951	0.864
May	214.6	76.42	17.95	220.9	209.7	18858	18589	0.850
June	217.9	73.69	21.23	215.6	204.0	18111	17835	0.836
July	255.5	58.85	25.36	257.8	244.7	21318	21020	0.823
August	223.7	57.51	28.10	240.2	228.4	19737	19461	0.818
September	155.3	51.24	20.14	181.6	172.7	15478	15252	0.848
October	122.5	39.23	13.43	160.6	152.5	14031	13826	0.869
November	72.9	30.77	10.91	104.1	98.5	9208	9059	0.879
December	70.2	21.10	5.42	114.3	107.7	10137	9985	0.882
Year	1804.9	577.69	14.46	2077.1	1970.2	178373	175739	0.855

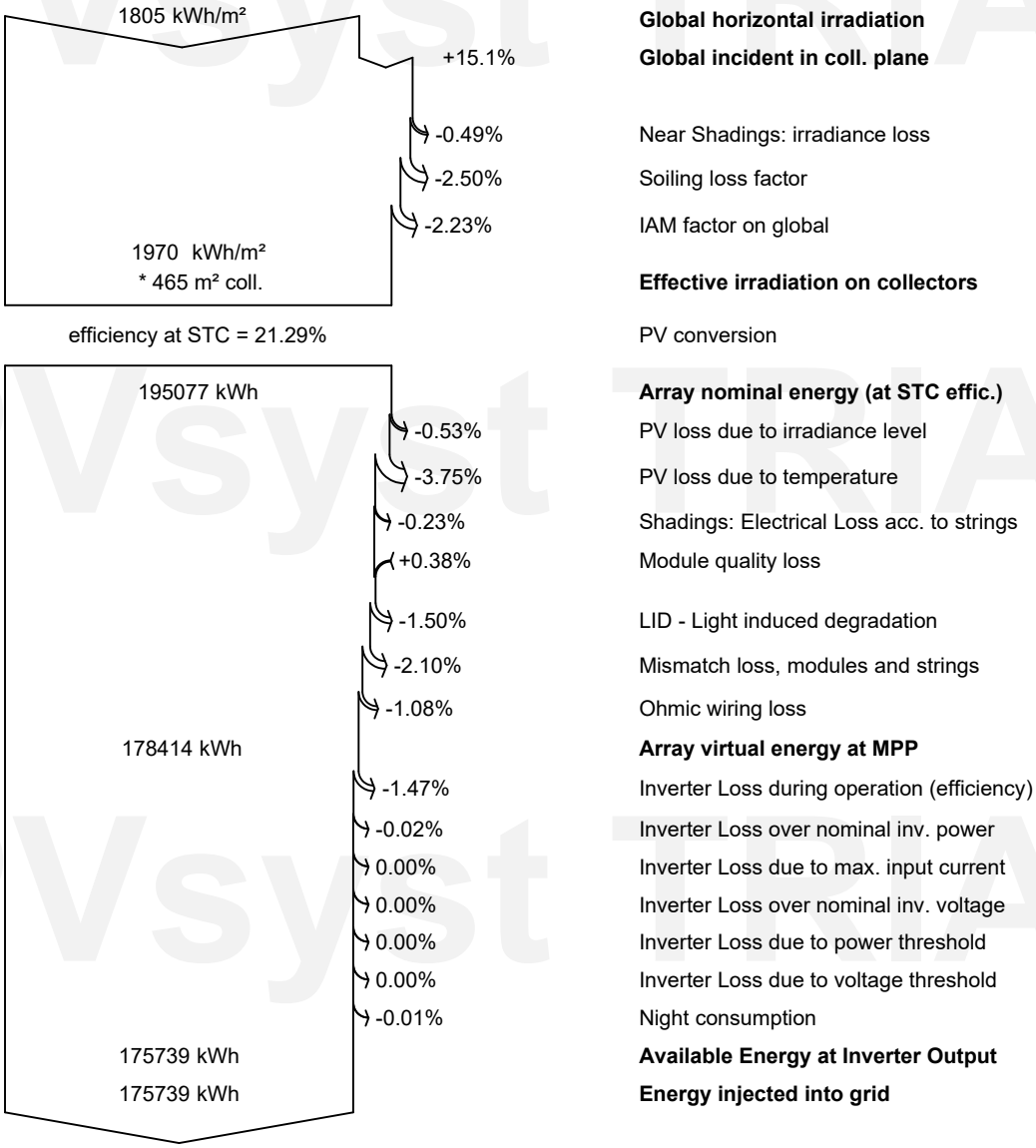
Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
30/07/26 22:11
with V8.1.4

Loss diagram

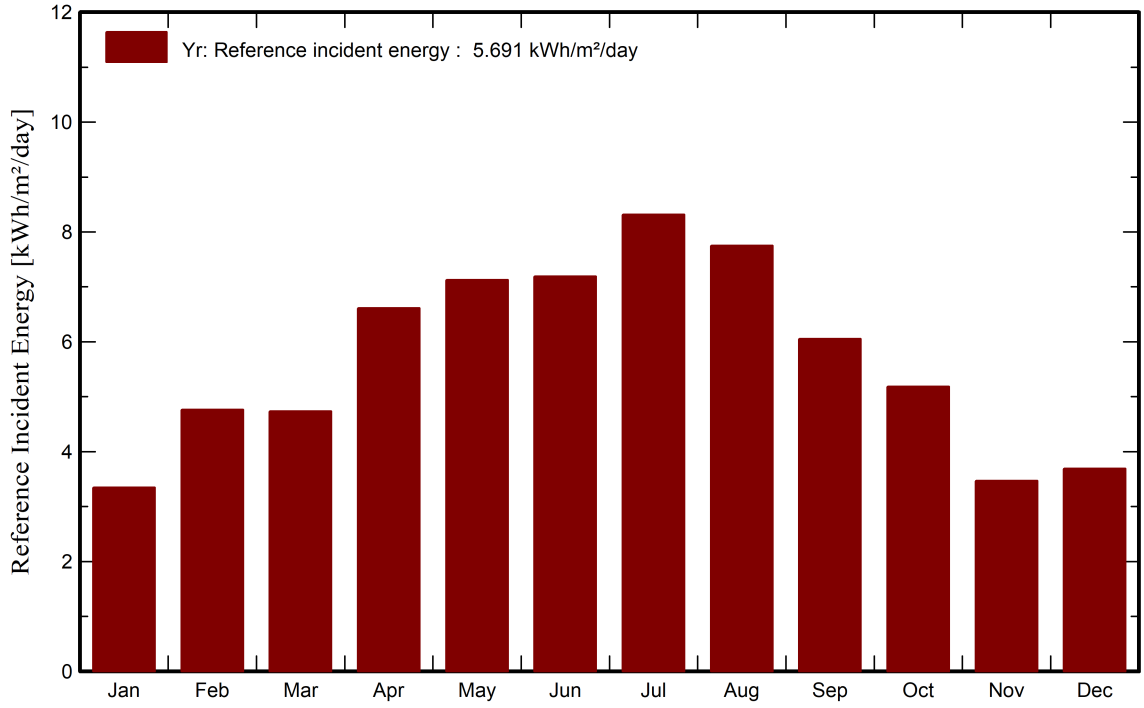


PVsyst TRIAL

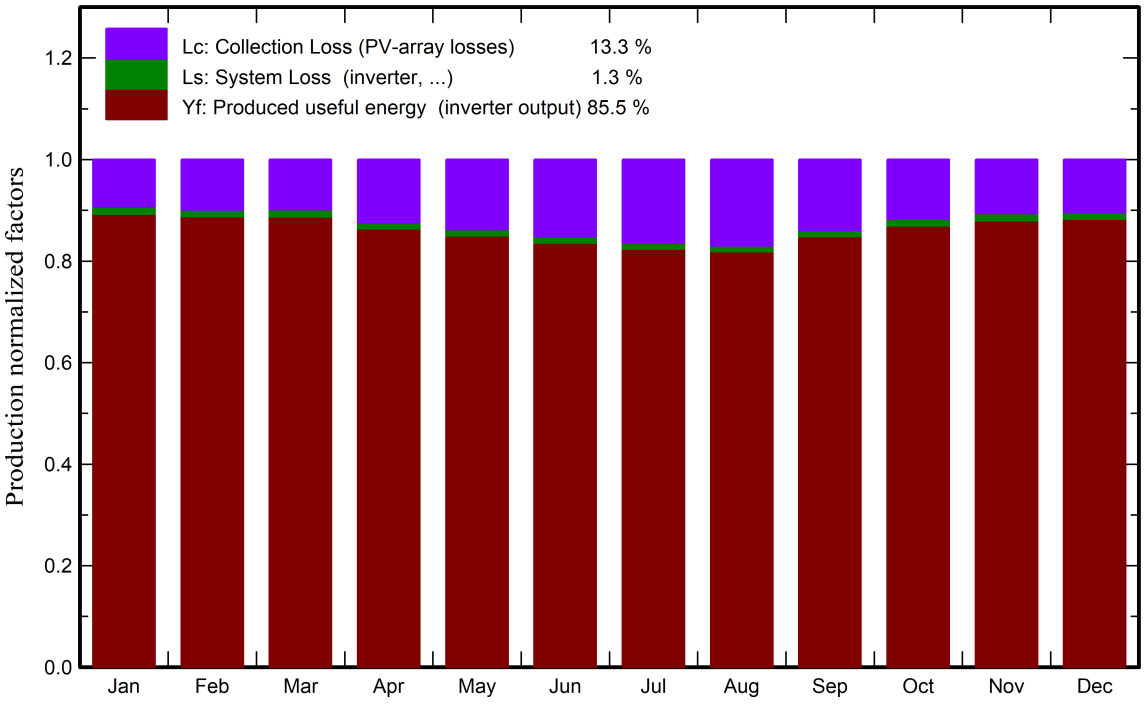
PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
30/07/26 22:11
with V8.1.4

Predef. graphs

Reference Incident Energy in Collector Plane

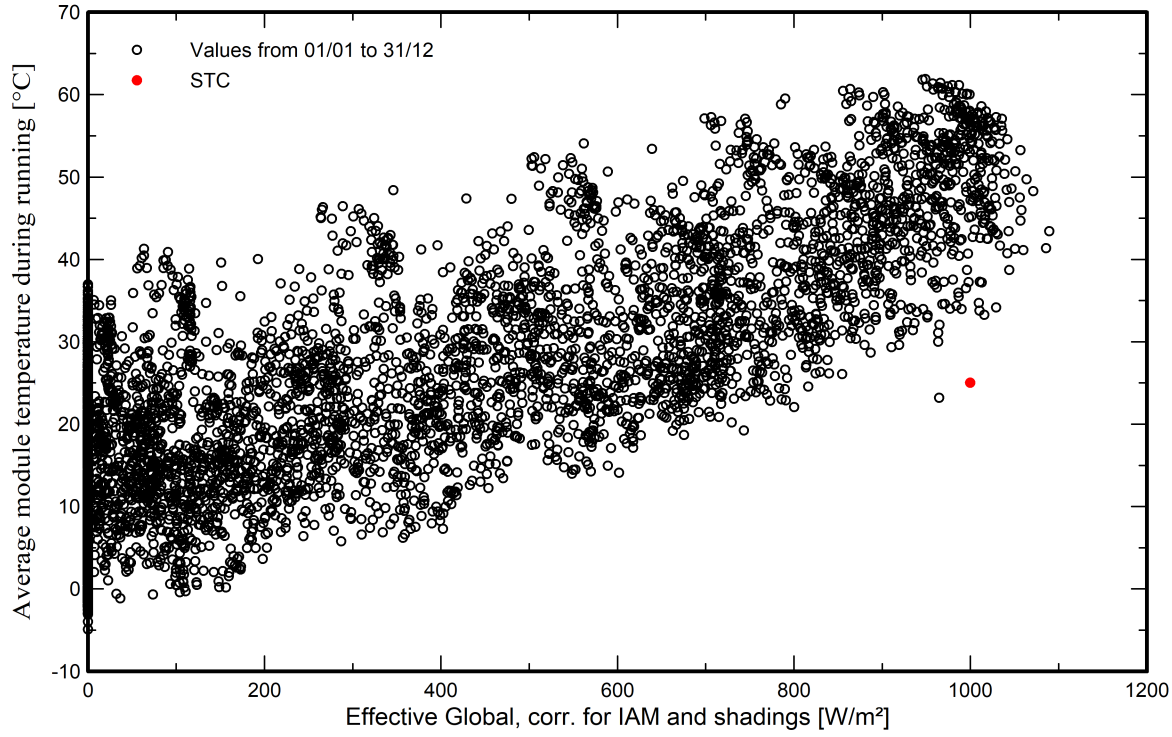


Normalized Production and Loss Factors

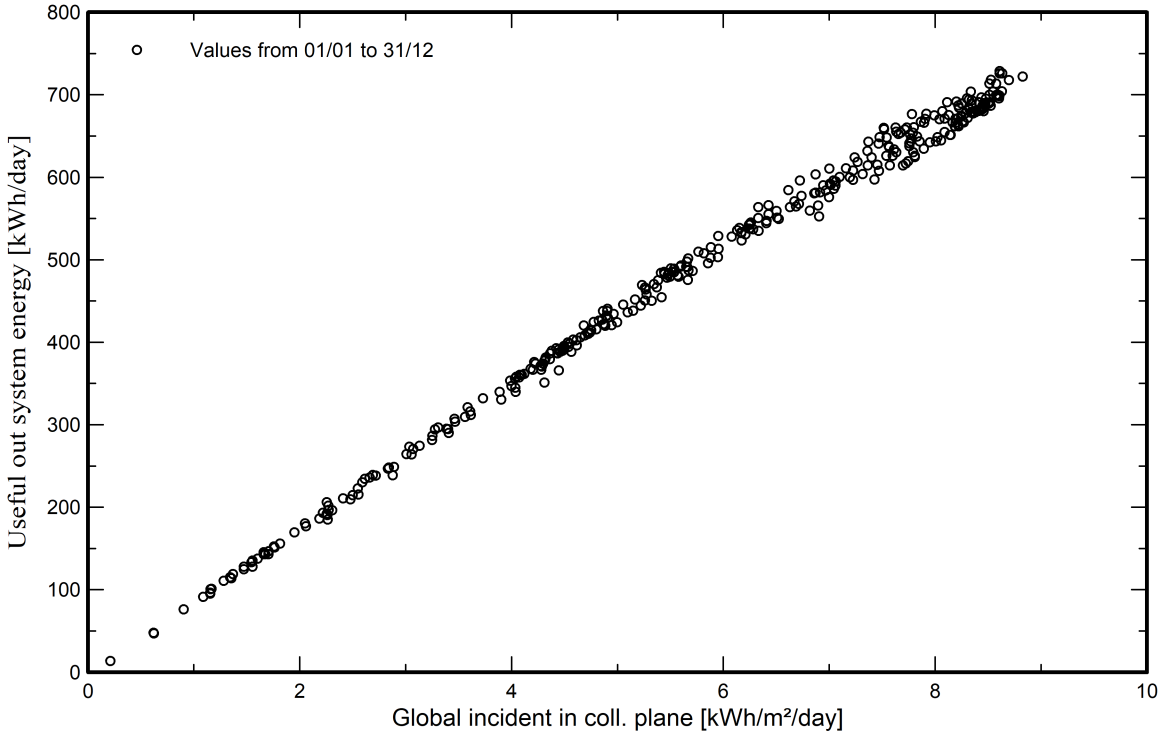


Predef. graphs

Array Temperature vs. Effective Irradiance

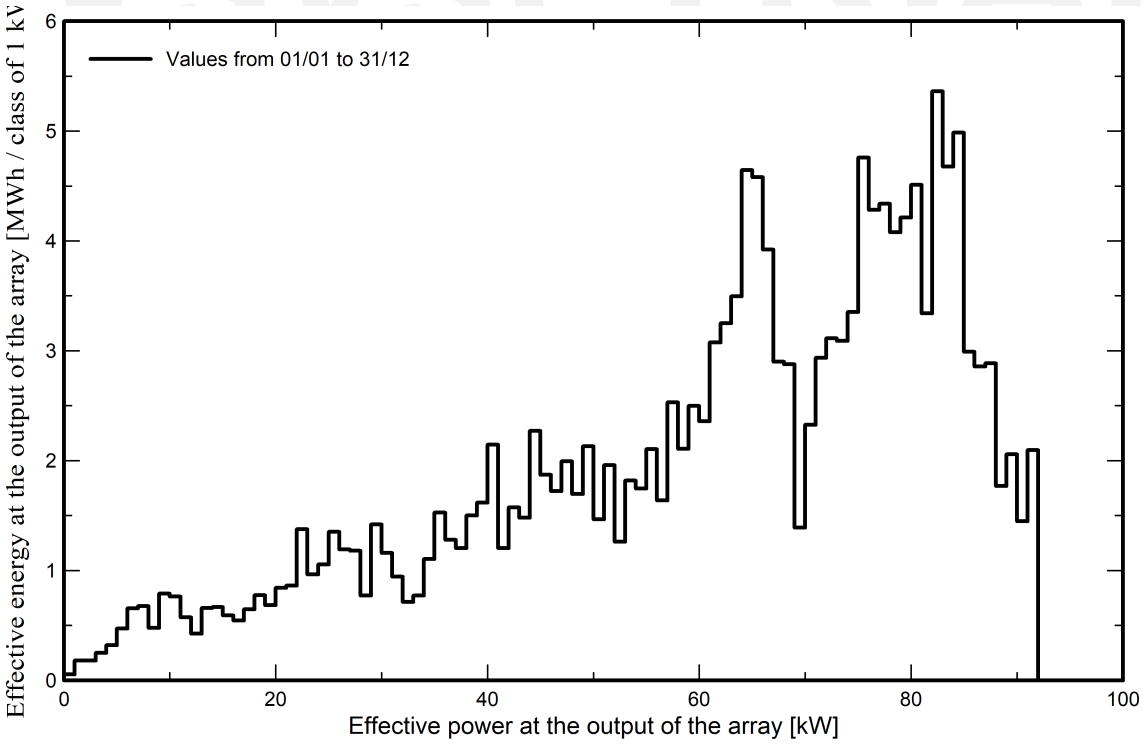


Daily Input/Output diagram

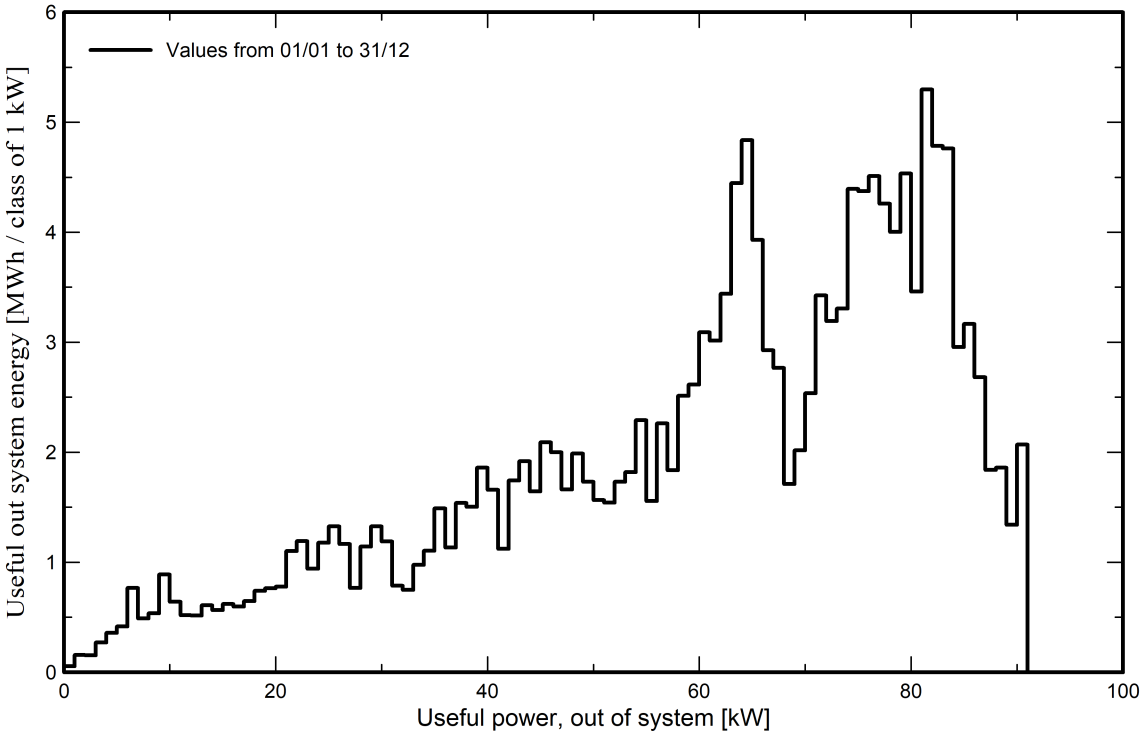


Predef. graphs

Array Power Distribution

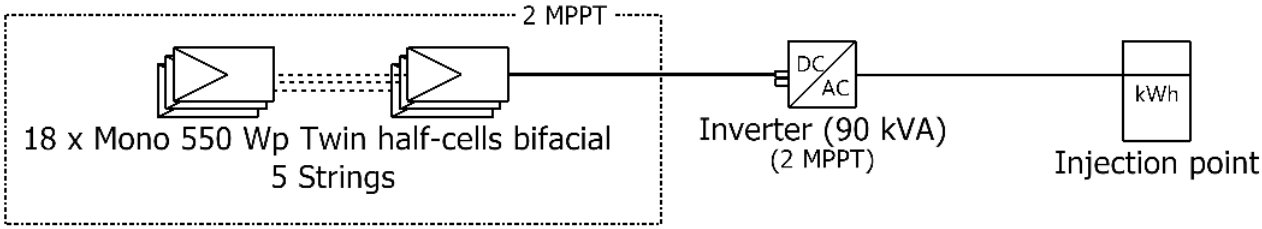


System Output Power Distribution



Single-line diagram

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
30/07/26 22:11
with V8.1.4



PV module	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial
Inverter	90 kWac inverter
String	18 x Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial

	Análisis APV	
	VC0 : Simulación Idoneidad Muy Alta	31/07/26

PVsyst V8.1.4

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: Análisis APV Alta02

Variant: Simulación Idoneidad Alta

Sheds, single array

System power: 99.0 kWp

Idoneidad Alta02 - Spain

Author

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:31
with V8.1.4

Project summary

Geographical Site
Idoneidad Alta02
Spain

Situation

Latitude	40.3240 °(N)
Longitude	-4.0988 °(W)
Altitude	593 m
Time zone	UTC+1

Project settings
Albedo 0.20

Weather data
Idoneidad Alta02
PVGIS api TMY

System summary

Grid-Connected System
Sheds, single array

Orientation #1
Fixed plane
Tilt/Azimuth 20 / 0 °

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules	180 units
Pnom total	99.0 kWp

Inverters

Nb. of units	1 unit
Total power	90 kWac
Pnom ratio	1.10

Results summary

Simulation step Hourly

Produced Energy	174991 kWh/year	Specific production	1768 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	85.40 %

Table of contents

Project and results summary 2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses 3
Near shading definition - Iso-shadings diagram 5
Main results 6
Loss diagram 7
Predef. graphs 8
Single-line diagram 11

PVsyst TRIAL

General parameters

Grid-Connected System — **Sheds, single array**

Simulation step
Hourly

Orientation #1

Fixed plane
Tilt/Azimuth 20 / 0 °

Sheds configuration
Nb. of sheds 10 units
Single array
Shading limit angle
Limit profile angle 4.6 °

Sizes
Sheds spacing 12.0 m
Sensitive width 2.29 m
GCR Shading 19.2 %
Top inactive band 0.02 m
Bottom inactive band 0.02 m

Models used
Transposition Perez
Diffuse Imported
Circumsolar separate

Horizon
Free Horizon

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module
Manufacturer Generic
Model Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power 550 Wp
Number of PV modules 180 units
Nominal (STC) 99.0 kWp
Modules 10 units x 18 In series
At operating cond. (50°C)
Pmpp 90.8 kWp
U mpp 680 V
I mpp 134 A

Inverter
Manufacturer Generic
Model 90 kWac inverter (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power 90 kWac
Number of inverters 1 unit
Total power 90.0 kWac
Operating voltage 180-1000 V
Pnom ratio (DC:AC) 1.10
Power sharing within this inverter

Total PV power
Nominal (STC) 99 kWp
Total 180 modules
Module area 465 m²
Cell area 429 m²

Total inverter power
Total power 90 kWac
Number of inverters 1 unit
Pnom ratio 1.10

Array losses

Array Soiling Losses
Loss Fraction 2.5 %

Thermal Loss factor
Module temperature according to irradiance
Uc (const) 29.0 W/m²K
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses
Global array res. 84 mΩ
Loss Fraction 1.50 % at STC

LID - Light Induced Degradation
Loss Fraction 1.50 %

Module Quality Loss
Loss Fraction -0.38 %

Module mismatch losses
Loss Fraction 2.00 % at MPP

Strings Mismatch loss
Loss Fraction 0.10 %

Array losses

IAM loss factor

Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.963	0.892	0.814	0.679	0.438	0.000

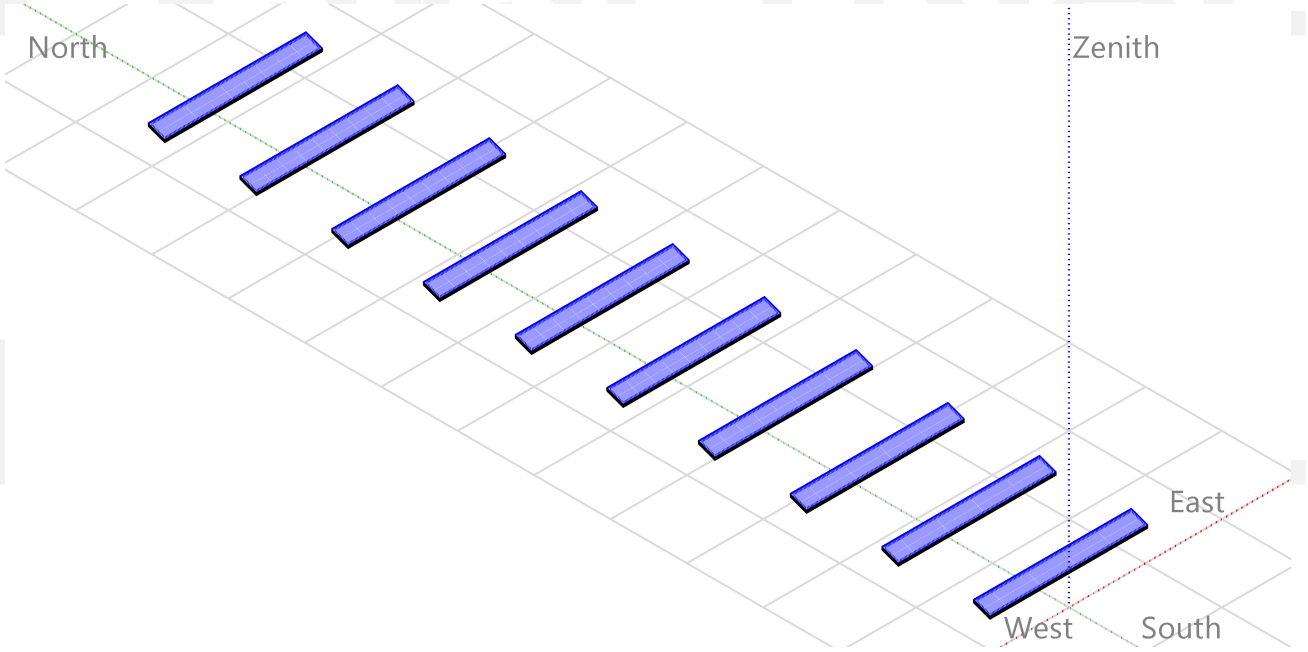
PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:31
with V8.1.4

PVsyst TRIAL

Near shadings parameter

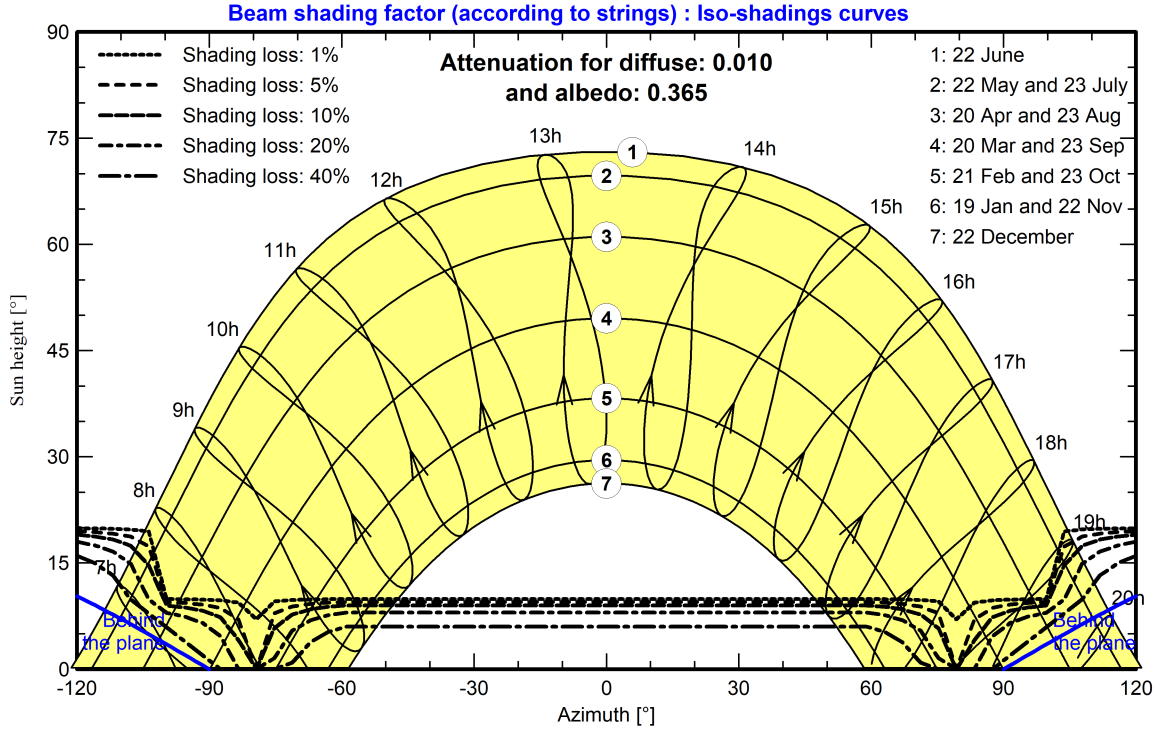
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1 - Fixed plane, Tilts/azimuths: 20°/ 0°

Beam shading factor (according to strings) : Iso-shadings curves



PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:31
with V8.1.4

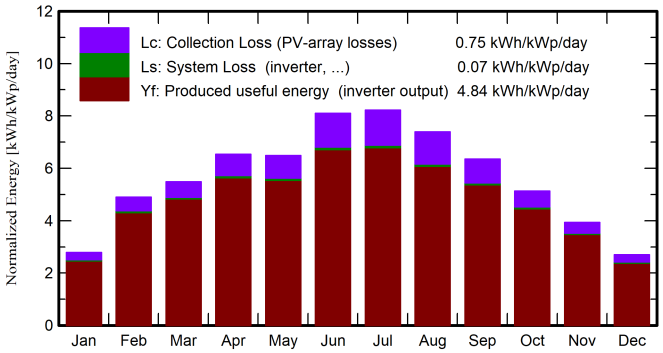
Main results

Simulation step
Hourly

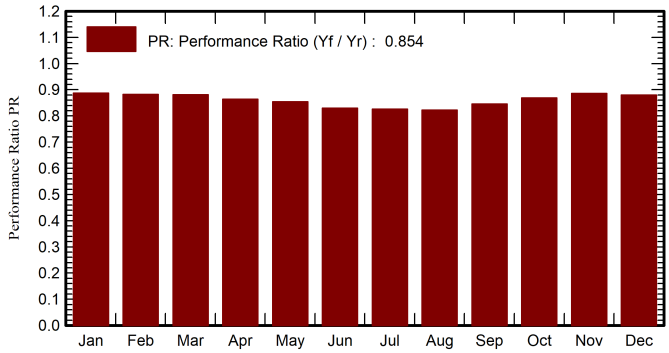
System Production

Produced Energy	174991 kWh/year	Specific production	1768 kWh/kWp/year
		Perf. Ratio PR	85.40 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	60.8	28.56	7.42	86.5	81.8	7741	7599	0.887
February	98.7	28.28	8.93	137.1	130.2	12150	11976	0.882
March	140.9	53.05	9.76	170.0	161.7	15054	14836	0.881
April	179.5	62.83	12.75	196.1	186.1	17024	16775	0.864
May	197.1	71.99	15.75	201.2	190.5	17275	17013	0.854
June	244.0	65.09	23.65	242.9	230.4	20252	19957	0.830
July	252.7	58.27	24.68	254.9	242.0	21140	20840	0.826
August	213.8	53.68	26.45	229.2	217.9	18942	18671	0.823
September	162.7	47.70	21.01	190.7	181.6	16198	15967	0.846
October	121.4	38.99	13.71	159.2	151.2	13901	13696	0.869
November	80.7	28.56	8.14	118.0	111.7	10507	10348	0.886
December	55.7	25.21	5.86	84.0	78.9	7451	7313	0.880
Year	1808.0	562.20	14.87	2069.8	1964.0	177636	174991	0.854

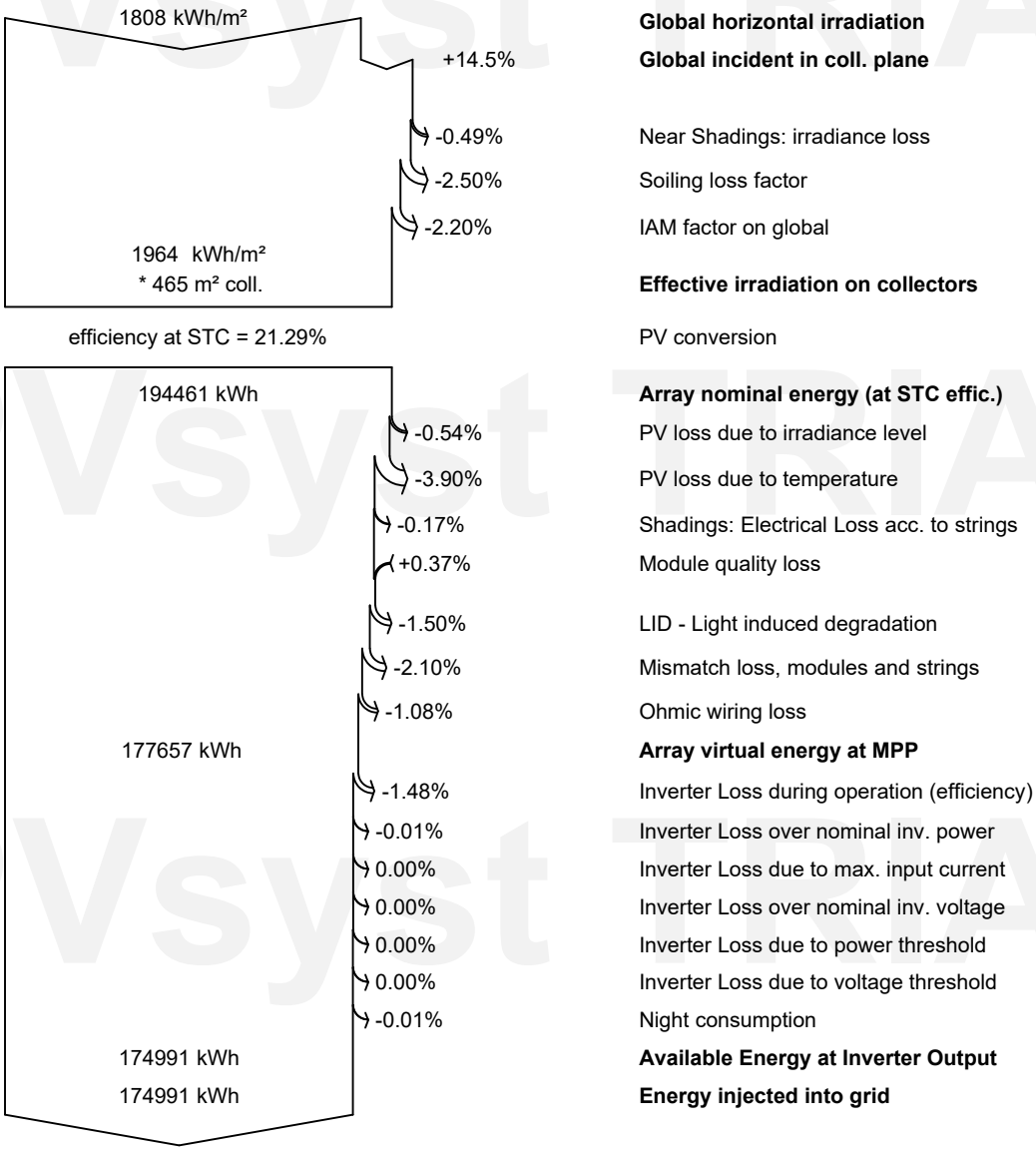
Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation
T_Amb	Ambient Temperature
GlobInc	Global incident in coll. plane
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
EArray	Effective energy at the output of the array
E_Grid	Energy injected into grid
PR	Performance Ratio

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:31
with V8.1.4

Loss diagram

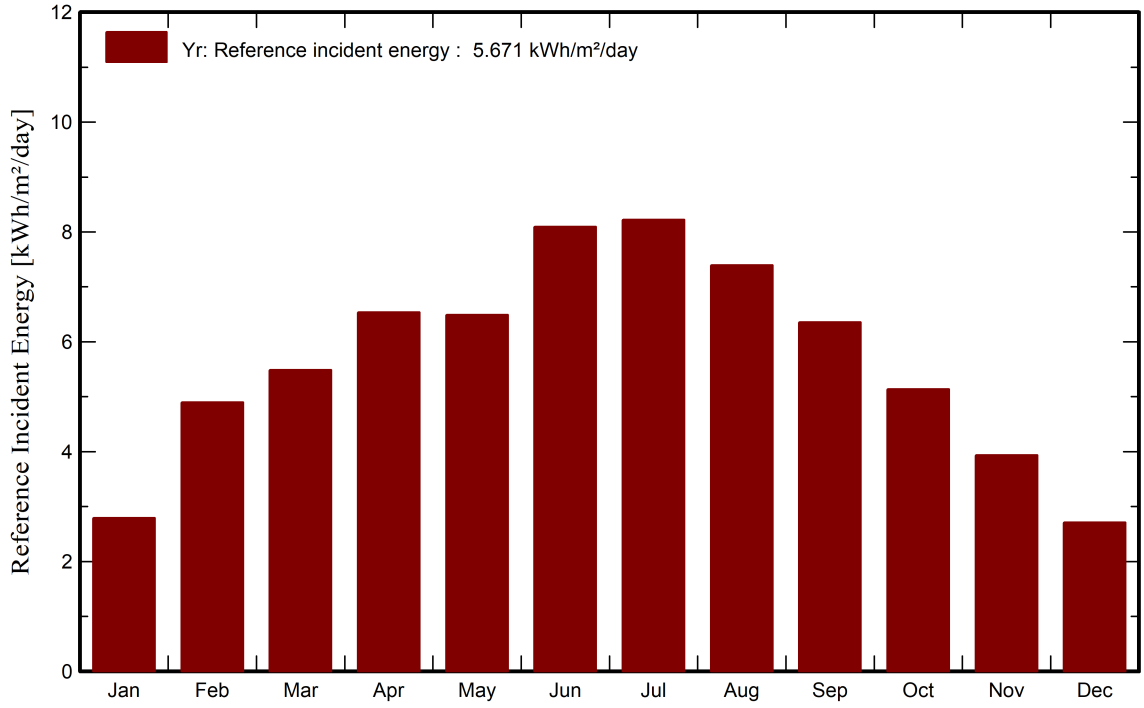


PVsyst TRIAL

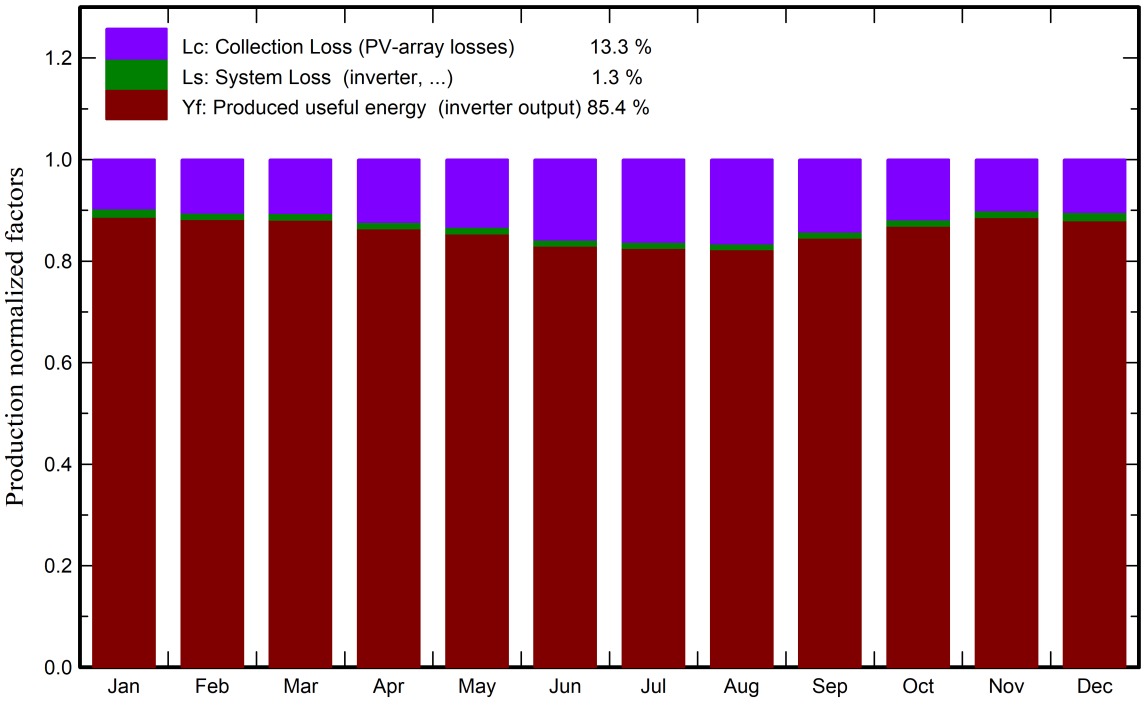
PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:31
with V8.1.4

Predef. graphs

Reference Incident Energy in Collector Plane



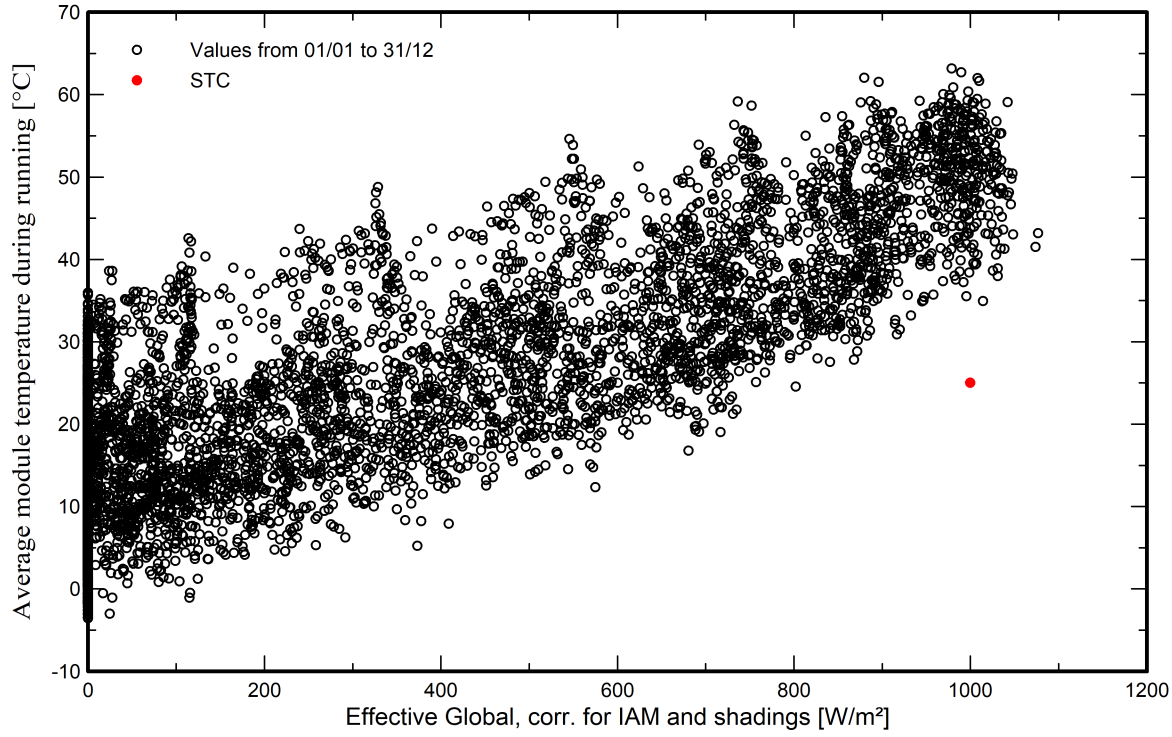
Normalized Production and Loss Factors



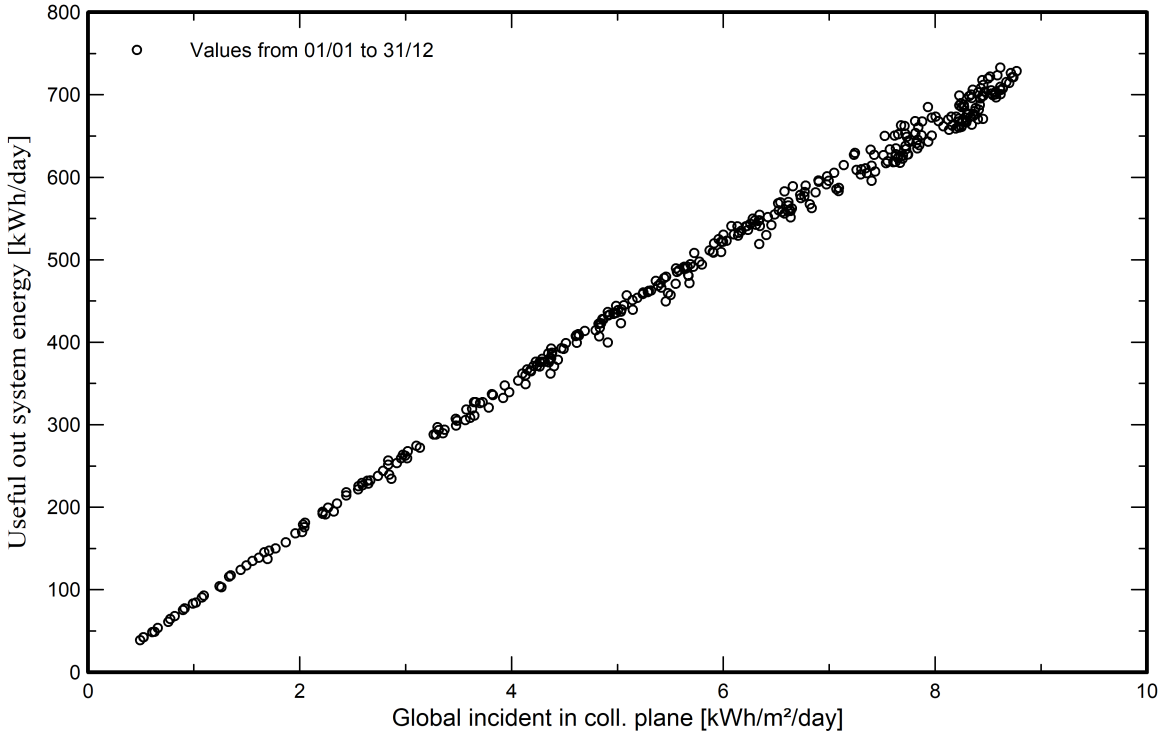
PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:31
with V8.1.4

Predef. graphs

Array Temperature vs. Effective Irradiance



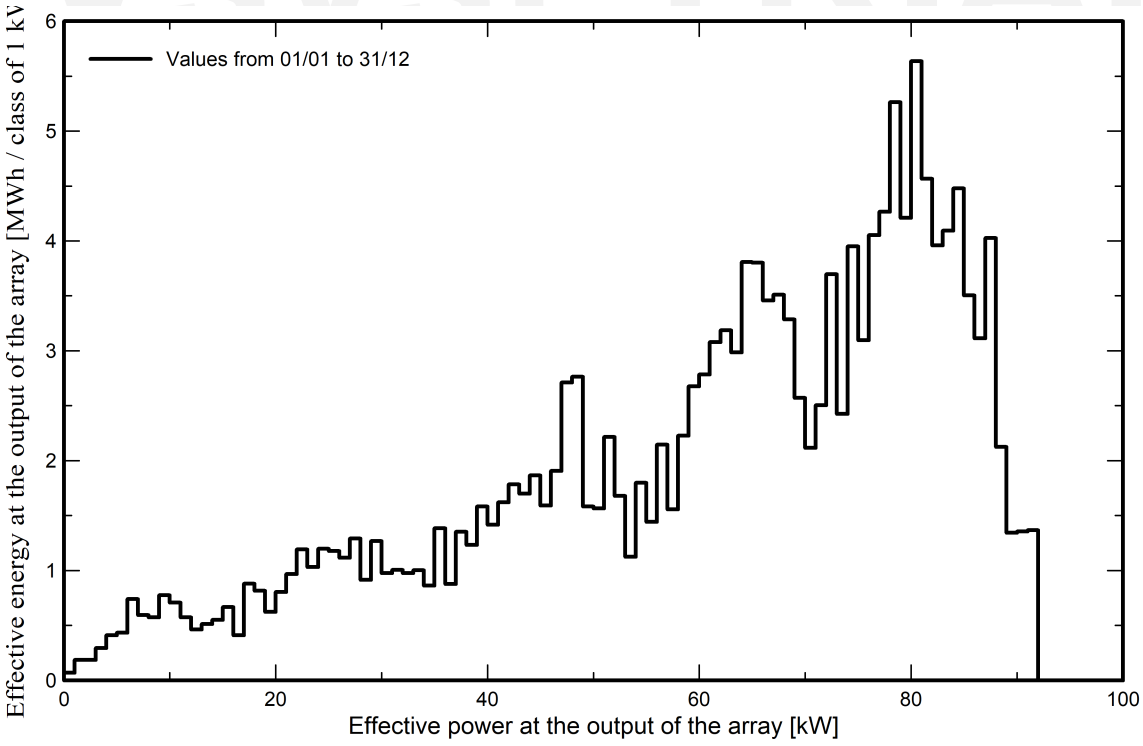
Daily Input/Output diagram



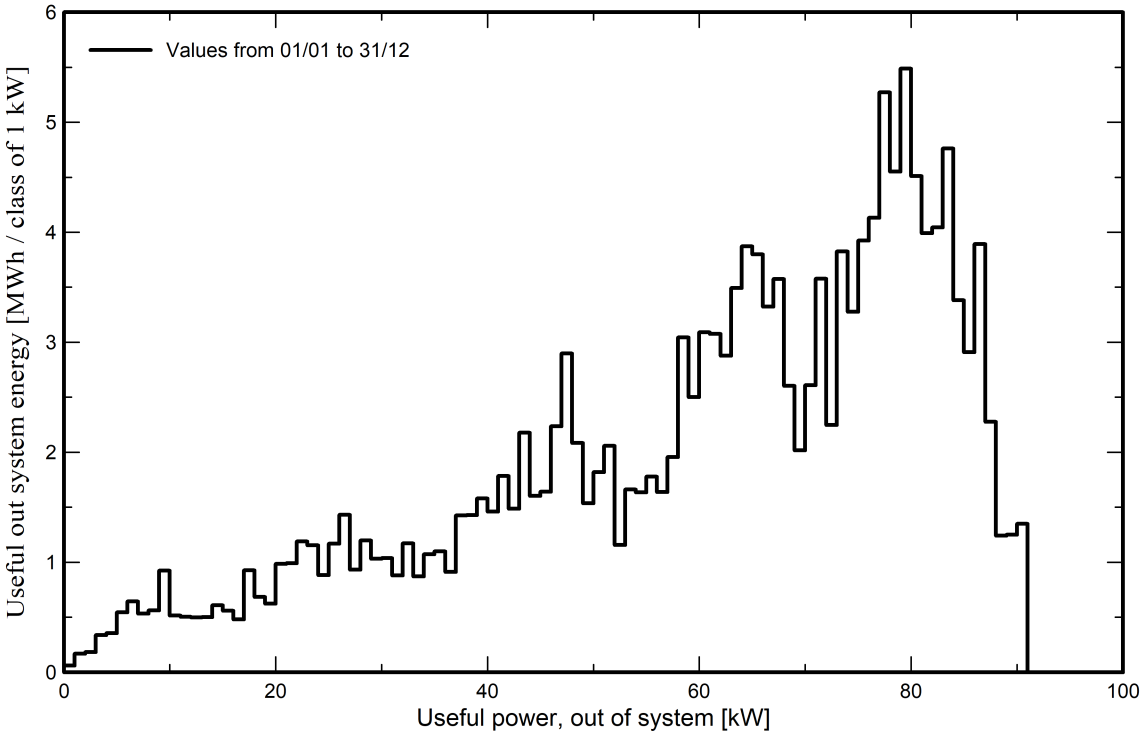
PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:31
with V8.1.4

Predef. graphs

Array Power Distribution

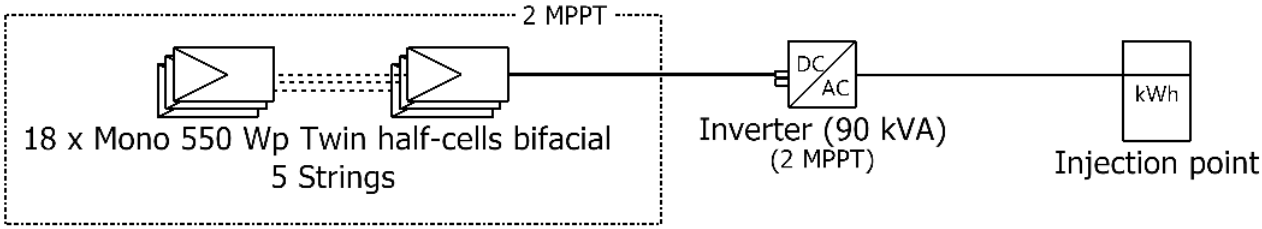


System Output Power Distribution



Single-line diagram

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:31
with V8.1.4



PV module	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial
Inverter	90 kWac inverter
String	18 x Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial

	Análisis APV Alta02	
	VC1 : Simulación Idoneidad Alta	01/08/26

PVsyst V8.1.4

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: Análisis APV Media02

Variant: Simulación Idoneidad Alta

Sheds, single array

System power: 99.0 kWp

Idoneidad Media02 - Spain

Author

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:36
with V8.1.4

Project summary

Geographical Site
Idoneidad Media02
Spain

Situation

Latitude	40.5308 °(N)
Longitude	-3.3021 °(W)
Altitude	604 m
Time zone	UTC+1

Project settings
Albedo 0.20

Weather data
Idoneidad Media02
PVGIS api TMY

System summary

Grid-Connected System
Sheds, single array

Orientation #1
Fixed plane
Tilt/Azimuth 20 / 0 °

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules	180 units
Pnom total	99.0 kWp

Inverters

Nb. of units	1 unit
Total power	90 kWac
Pnom ratio	1.10

Results summary

Simulation step Hourly

Produced Energy	170484 kWh/year	Specific production	1722 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	85.47 %

Table of contents

Project and results summary 2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses 3
Near shading definition - Iso-shadings diagram 5
Main results 6
Loss diagram 7
Predef. graphs 8
Single-line diagram 11

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:36
with V8.1.4

General parameters

Grid-Connected System — **Sheds, single array**

Simulation step
Hourly

Orientation #1

Fixed plane

Tilt/Azimuth	20 / 0 °

Sheds configuration

Nb. of sheds	10 units
Single array	

Shading limit angle

Limit profile angle	4.6 °

Sizes

Sheds spacing	12.0 m
Sensitive width	2.29 m
GCR Shading	19.2 %
Top inactive band	0.02 m
Bottom inactive band	0.02 m

Models used

Transposition	Perez
Diffuse	Imported
Circumsolar	separate

Horizon
Free Horizon

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer	Generic
Model	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	550 Wp
Number of PV modules	180 units
Nominal (STC)	99.0 kWp
Modules	10 units x 18 In series
At operating cond. (50°C)	
Pmpp	90.8 kWp
U mpp	680 V
I mpp	134 A

Inverter

Manufacturer	Generic
Model	90 kWac inverter (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Total power	90.0 kWac
Operating voltage	180-1000 V
Pnom ratio (DC:AC)	1.10
Power sharing within this inverter	

Total PV power

Nominal (STC)	99 kWp
Total	180 modules
Module area	465 m²
Cell area	429 m²

Total inverter power

Total power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Pnom ratio	1.10

Array losses

Array Soiling Losses

Loss Fraction	2.5 %

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance	
Uc (const)	29.0 W/m²K
Uv (wind)	0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses

Global array res.	84 mΩ
Loss Fraction	1.50 % at STC

LID - Light Induced Degradation

Loss Fraction	1.50 %

Module Quality Loss

Loss Fraction	-0.38 %

Module mismatch losses

Loss Fraction	2.00 % at MPP

Strings Mismatch loss

Loss Fraction	0.10 %

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:36
with V8.1.4

Array losses

IAM loss factor

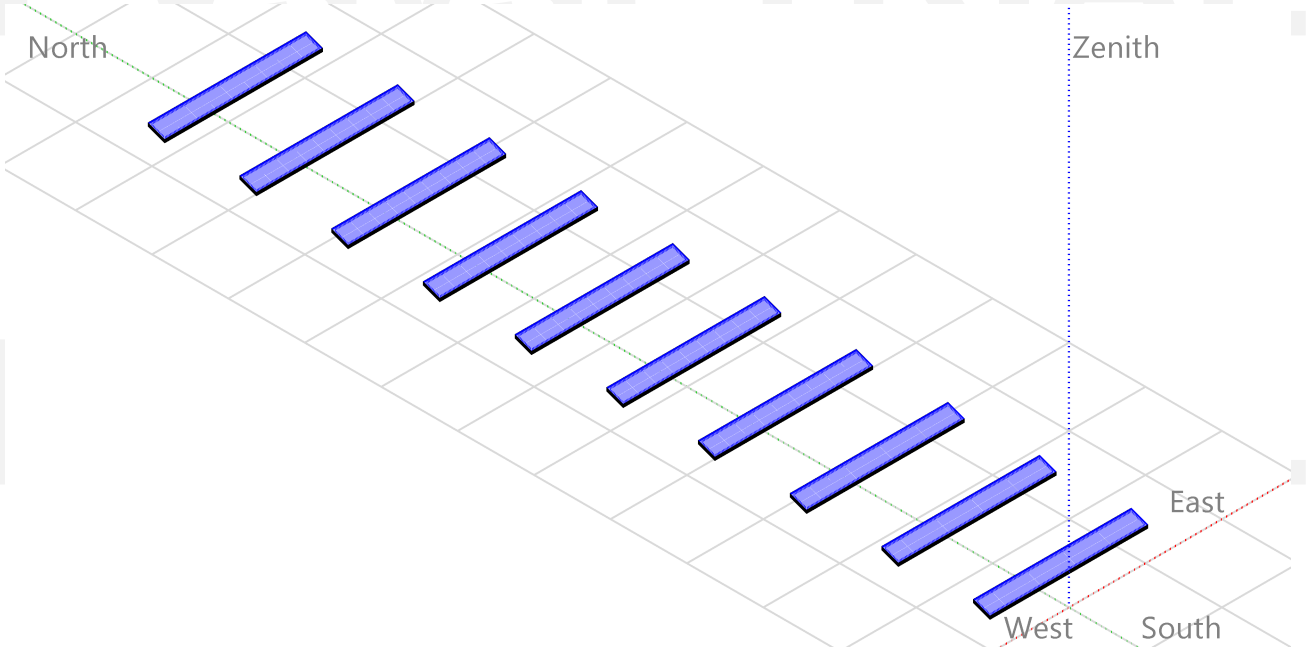
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.963	0.892	0.814	0.679	0.438	0.000

PVsyst TRIAL

Near shadings parameter

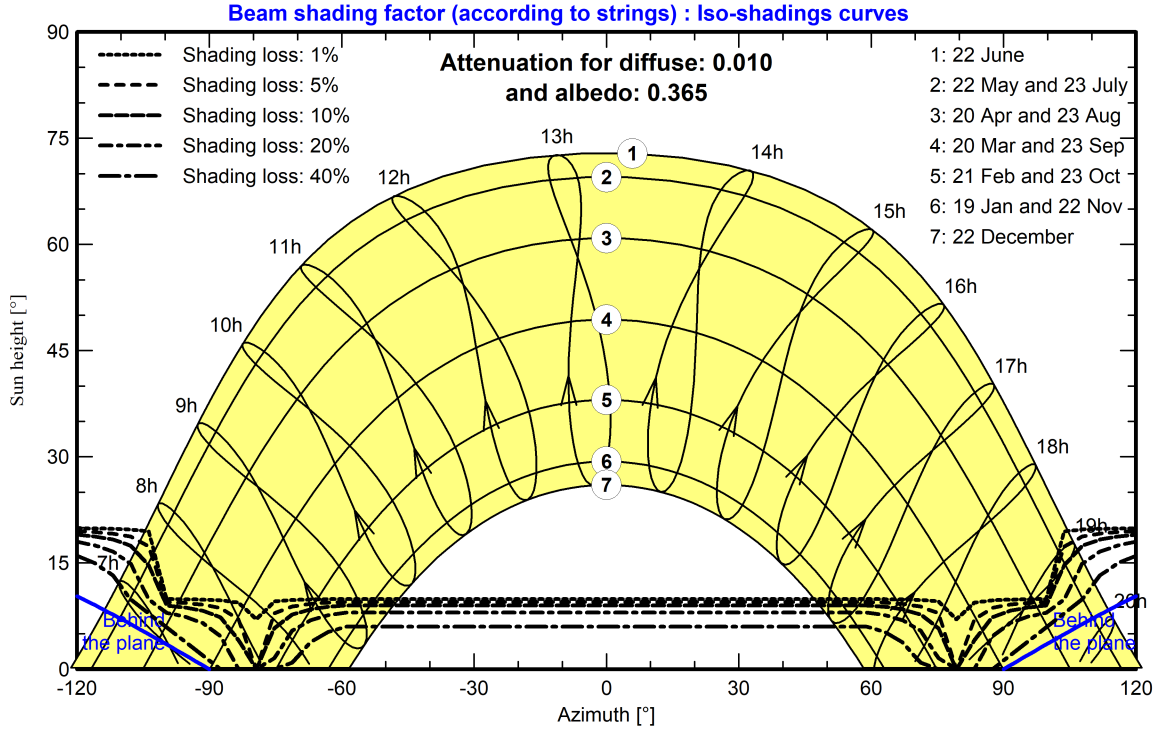
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1 - Fixed plane, Tilts/azimuths: 20°/ 0°

Beam shading factor (according to strings) : Iso-shadings curves



PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:36
with V8.1.4

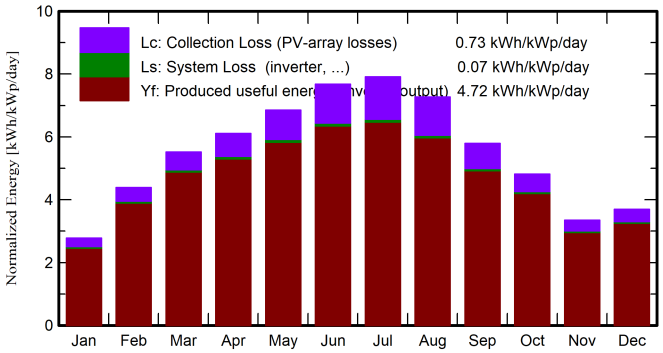
Main results

Simulation step
Hourly

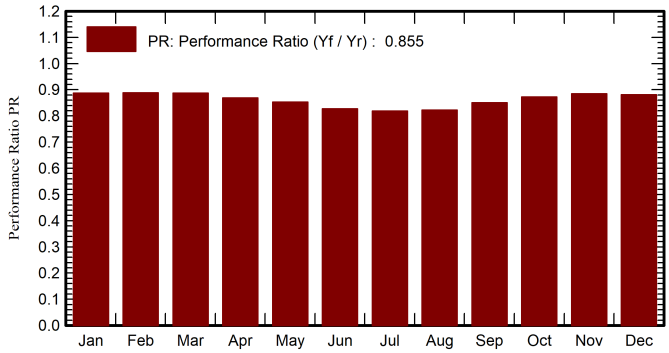
System Production

Produced Energy	170484 kWh/year	Specific production	1722 kWh/kWp/year
		Perf. Ratio PR	85.47 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	61.0	30.70	5.93	86.2	81.2	7708	7569	0.887
February	90.7	29.29	5.35	122.8	116.4	10970	10802	0.888
March	142.0	55.27	7.43	170.9	162.2	15225	15003	0.887
April	167.1	58.60	10.79	183.3	174.1	15996	15763	0.869
May	206.9	77.22	16.77	212.3	201.1	18179	17915	0.852
June	231.0	66.15	24.47	230.5	218.7	19143	18870	0.827
July	242.6	60.87	27.00	245.2	232.8	20153	19862	0.818
August	209.4	50.71	26.09	225.2	214.2	18603	18344	0.823
September	149.3	53.82	19.58	173.9	165.4	14863	14642	0.850
October	115.0	39.14	12.47	149.3	141.8	13100	12904	0.873
November	71.1	28.94	8.42	100.6	95.3	8958	8810	0.884
December	70.1	20.77	3.69	114.6	107.9	10156	10000	0.881
Year	1756.2	571.47	14.05	2014.9	1911.0	173055	170484	0.855

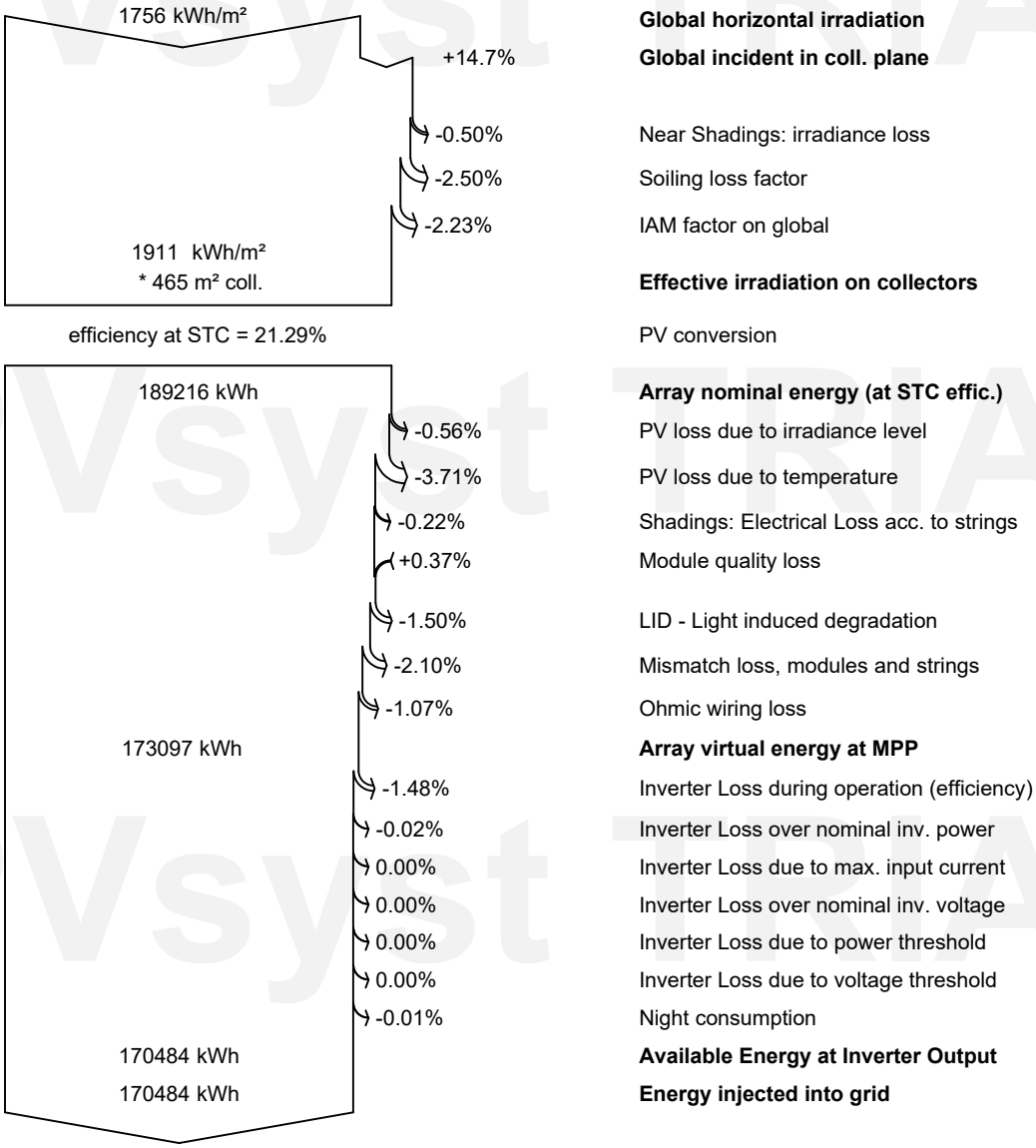
Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:36
with V8.1.4

Loss diagram

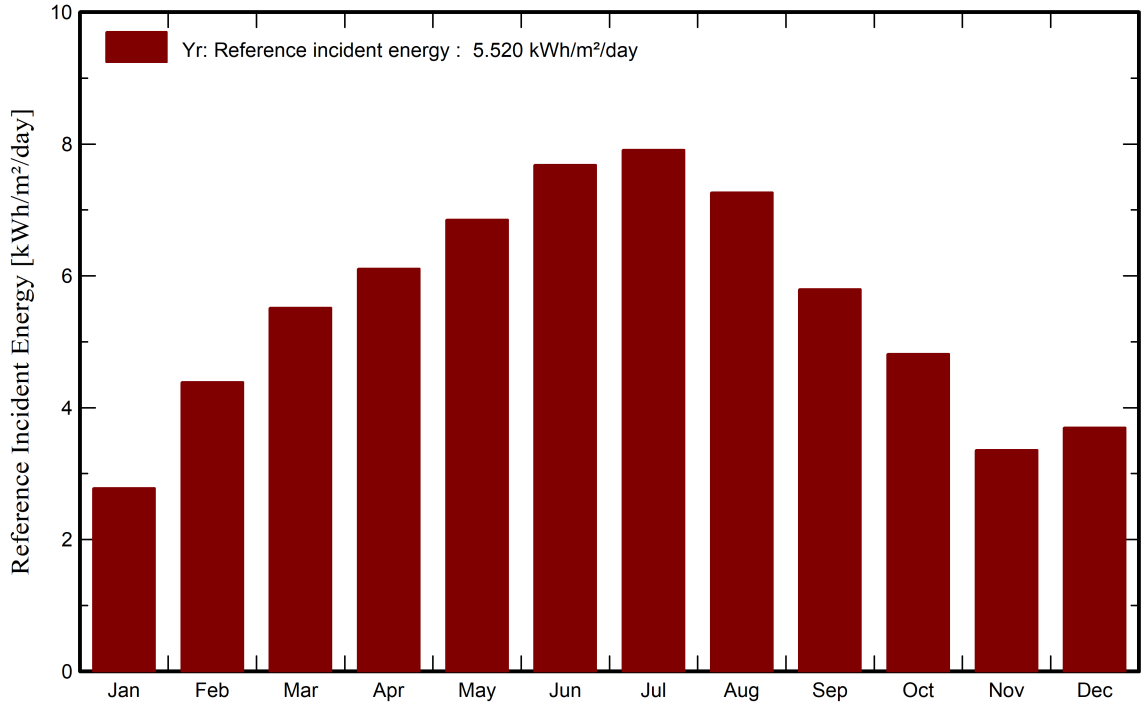


PVsyst TRIAL

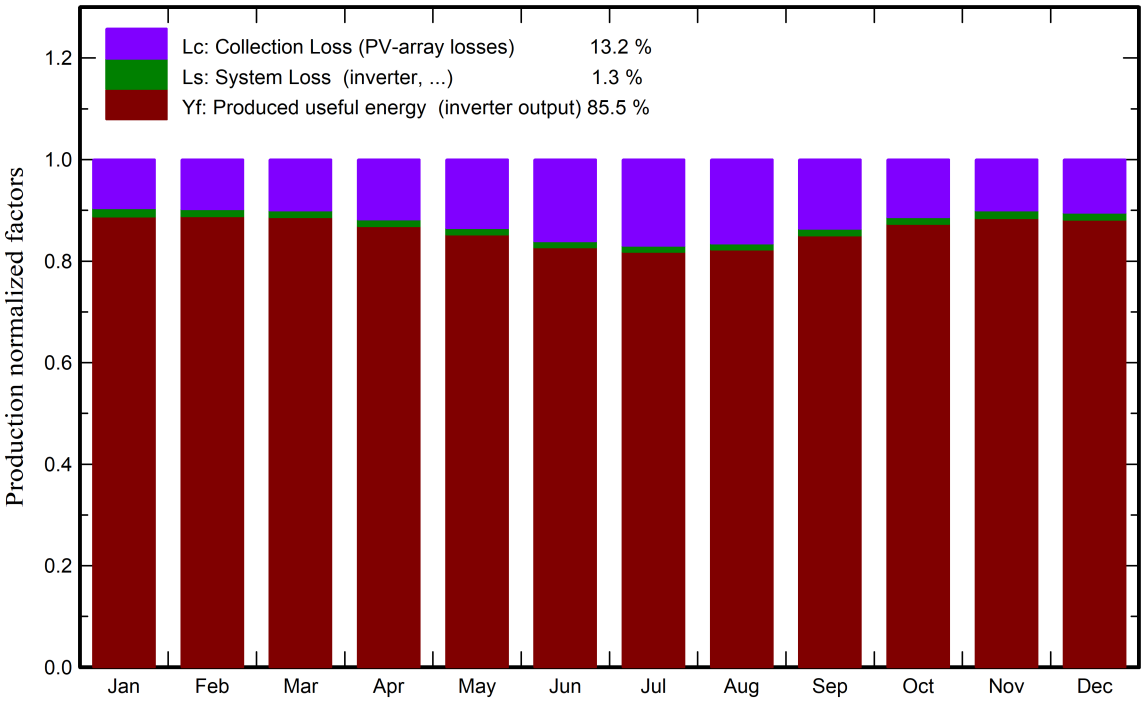
PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:36
with V8.1.4

Predef. graphs

Reference Incident Energy in Collector Plane



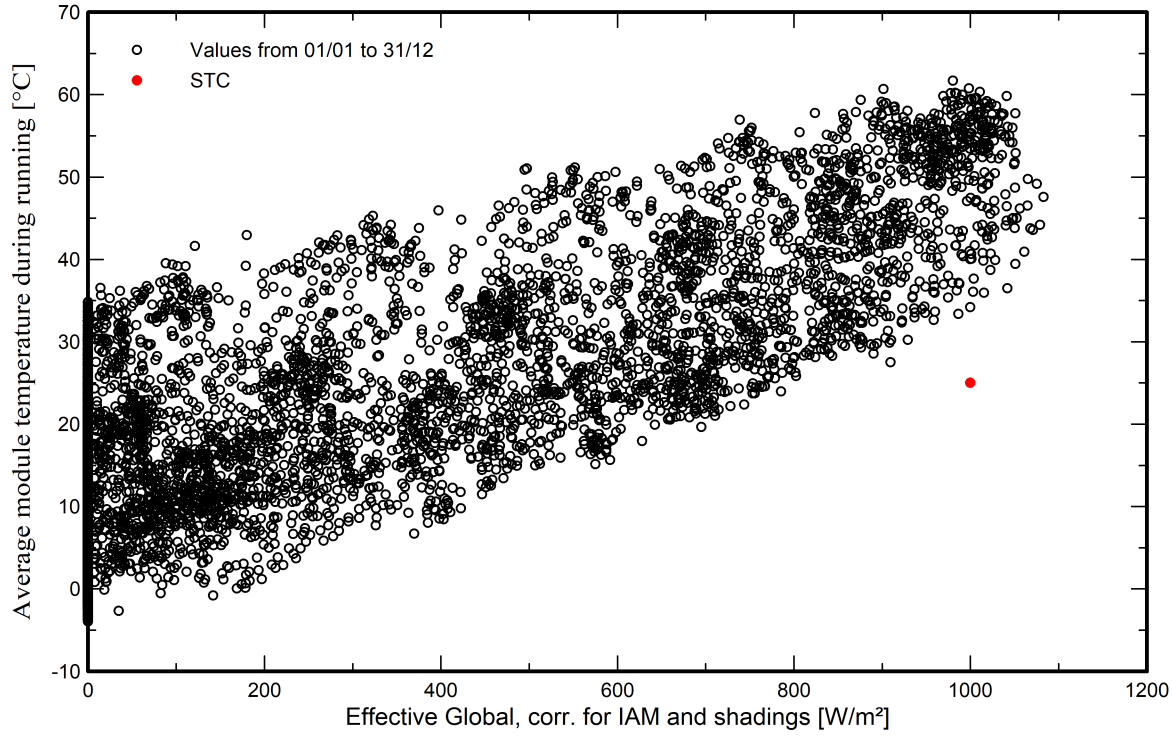
Normalized Production and Loss Factors



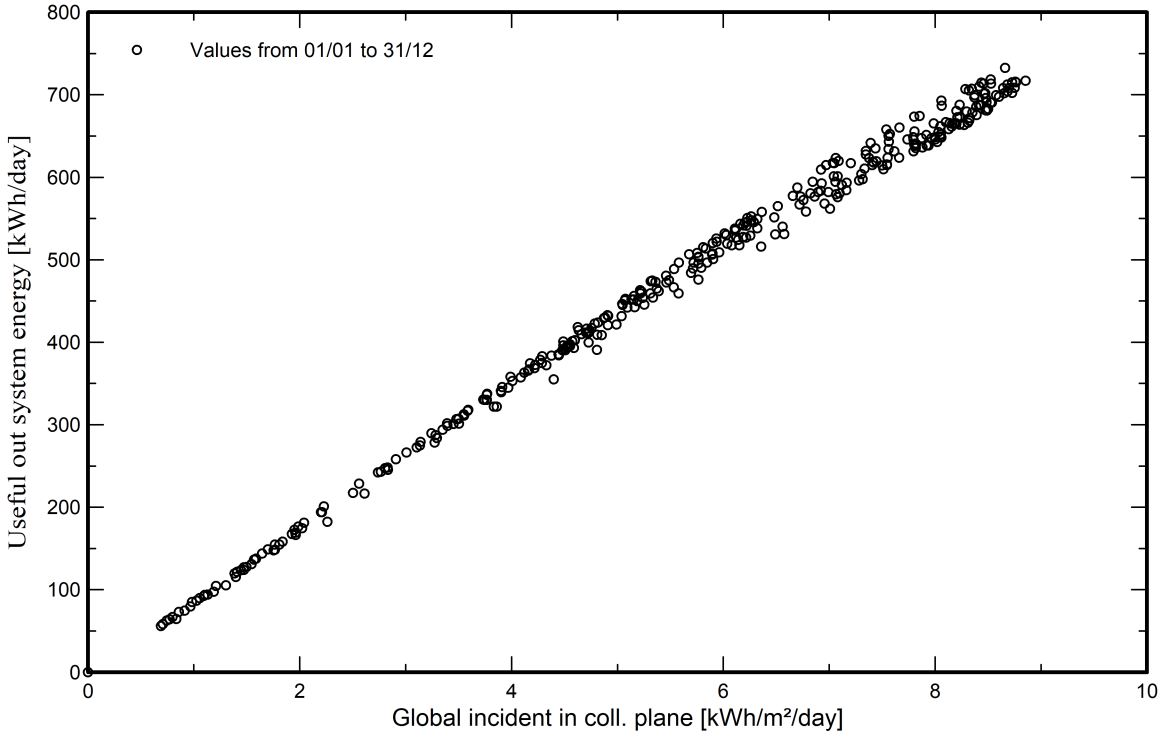
PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:36
with V8.1.4

Predef. graphs

Array Temperature vs. Effective Irradiance



Daily Input/Output diagram

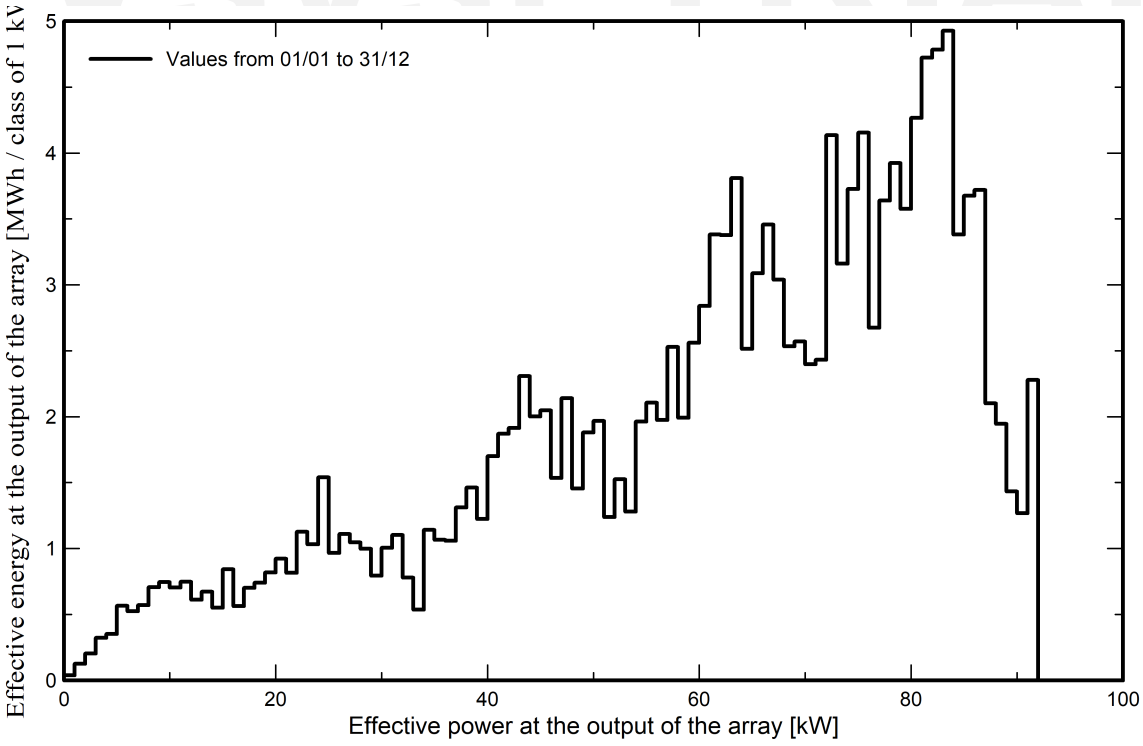


PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:36
with V8.1.4

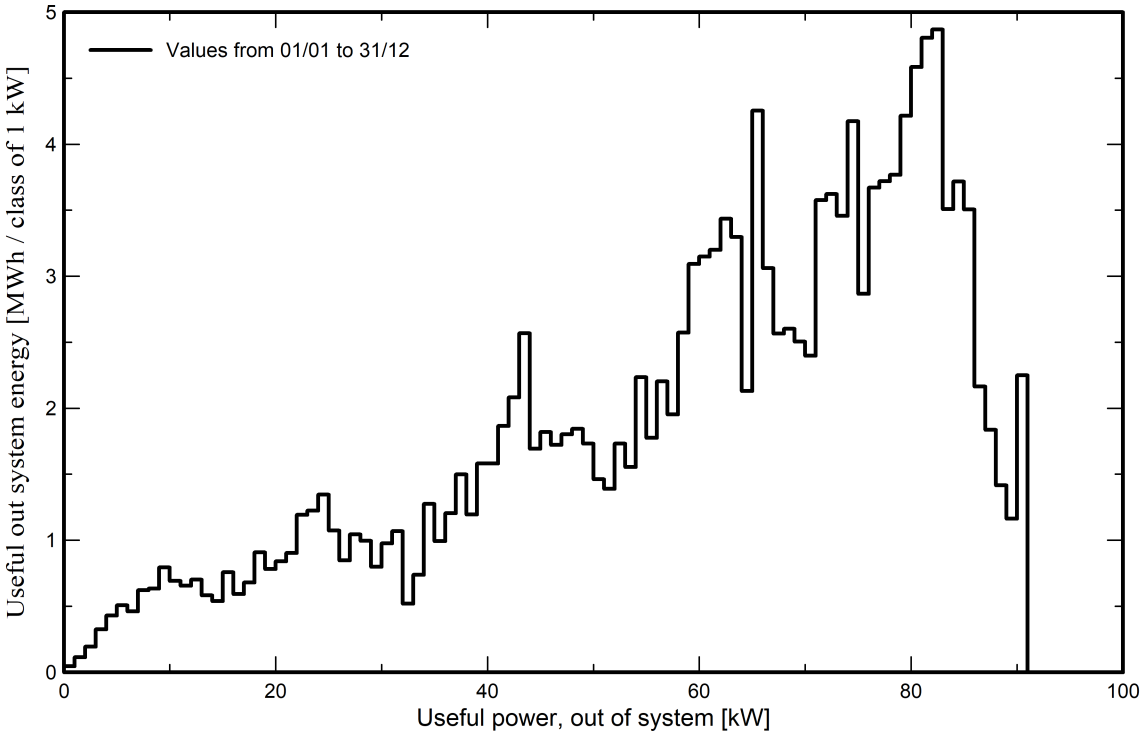
PVsyst TRIAL

Predef. graphs

Array Power Distribution

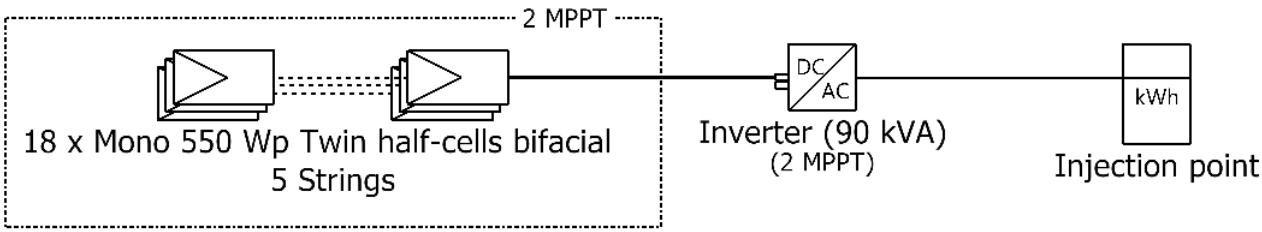


System Output Power Distribution



Single-line diagram

PVsyst V8.1.4
VC1, Simulation date:
01/08/26 15:36
with V8.1.4



PV module	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial
Inverter	90 kWac inverter
String	18 x Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial

	Análisis APV Media02	
	VC1 : Simulación Idoneidad Alta	01/08/26

PVsyst V8.1.4

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: Análisis APV alta2

Variant: Simulación Idoneidad Muy Alta

Sheds, single array

System power: 99.0 kWp

Muy Alta2 - Spain

Author

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
01/08/26 14:57
with V8.1.4

Project summary

Geographical Site
Muy Alta2
Spain

Situation

Latitude	40.0788 °(N)
Longitude	-3.5813 °(W)
Altitude	556 m
Time zone	UTC+1

Project settings
Albedo 0.20

Weather data
Muy Alta2
PVGIS api TMY

System summary

Grid-Connected System
Sheds, single array

Orientation #1
Fixed plane
Tilt/Azimuth 20 / 0 °

Near Shadings
According to strings : Fast (table)
Electrical effect 100 %

User's needs
Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules	180 units
Pnom total	99.0 kWp

Inverters

Nb. of units	1 unit
Total power	90 kWac
Pnom ratio	1.10

Results summary

Simulation step Hourly

Produced Energy	178534 kWh/year	Specific production	1803 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	85.19 %

Table of contents

Project and results summary 2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses 3
Near shading definition - Iso-shadings diagram 5
Main results 6
Loss diagram 7
Predef. graphs 8
Single-line diagram 11

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
01/08/26 14:57
with V8.1.4

General parameters

Grid-Connected System — **Sheds, single array**

Simulation step
Hourly

Orientation #1

Fixed plane		**Sheds configuration**		**Sizes**	
Tilt/Azimuth	20 / 0 °	Nb. of sheds	10 units	Sheds spacing	12.0 m
		Single array		Sensitive width	2.29 m
		Shading limit angle		GCR Shading	19.2 %
		Limit profile angle	4.6 °	Top inactive band	0.02 m
				Bottom inactive band	0.02 m

Models used		**Horizon**	**Near Shadings**	
Transposition	Perez	Free Horizon	According to strings : Fast (table)	
Diffuse	Imported		Electrical effect	100 %
Circumsolar	separate			

User's needs
Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer	Generic
Model	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	550 Wp
Number of PV modules	180 units
Nominal (STC)	99.0 kWp
Modules	10 units x 18 In series
At operating cond. (50°C)	
Pmpp	90.8 kWp
U mpp	680 V
I mpp	134 A

Inverter

Manufacturer	Generic
Model	90 kWac inverter (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Total power	90.0 kWac
Operating voltage	180-1000 V
Pnom ratio (DC:AC)	1.10
Power sharing within this inverter	

Total PV power

Nominal (STC)	99 kWp
Total	180 modules
Module area	465 m²
Cell area	429 m²

Total inverter power

Total power	90 kWac
Number of inverters	1 unit
Pnom ratio	1.10

Array losses

Array Soiling Losses
Loss Fraction 2.5 %

Thermal Loss factor
Module temperature according to irradiance
Uc (const) 29.0 W/m²K
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses
Global array res. 84 mΩ
Loss Fraction 1.50 % at STC

LID - Light Induced Degradation
Loss Fraction 1.50 %

Module Quality Loss
Loss Fraction -0.38 %

Module mismatch losses
Loss Fraction 2.00 % at MPP

Strings Mismatch loss
Loss Fraction 0.10 %

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
01/08/26 14:57
with V8.1.4

Array losses

IAM loss factor

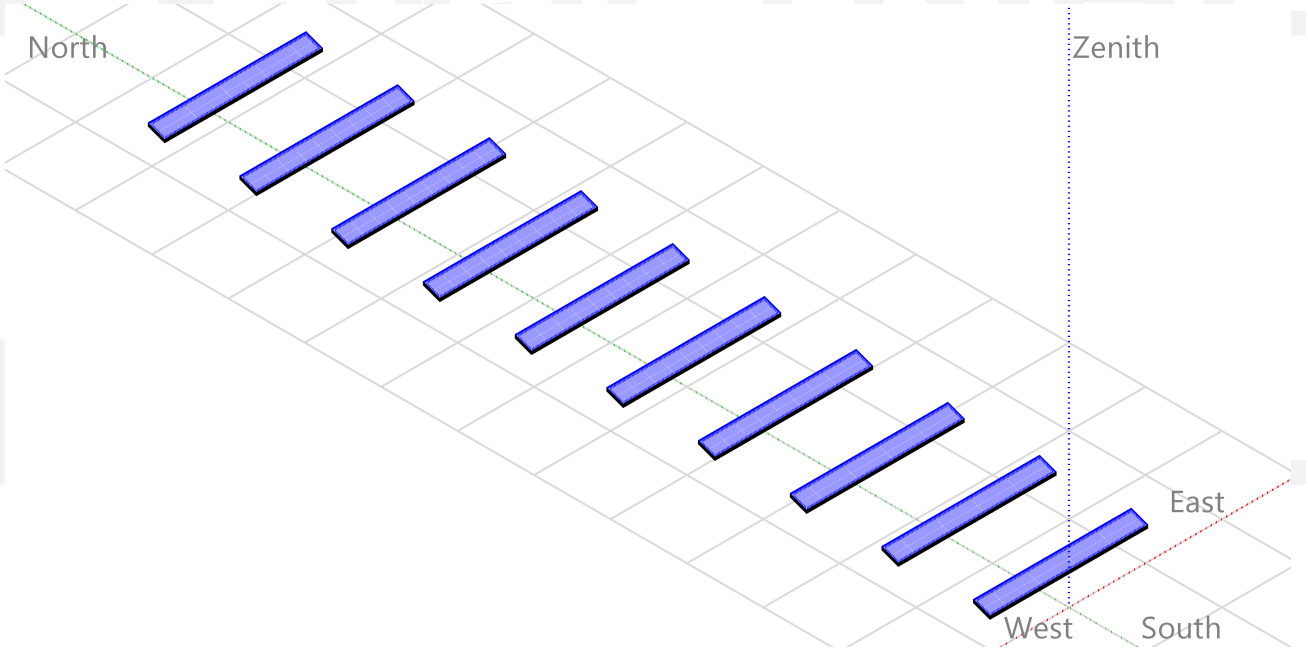
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.963	0.892	0.814	0.679	0.438	0.000

PVsyst TRIAL

Near shadings parameter

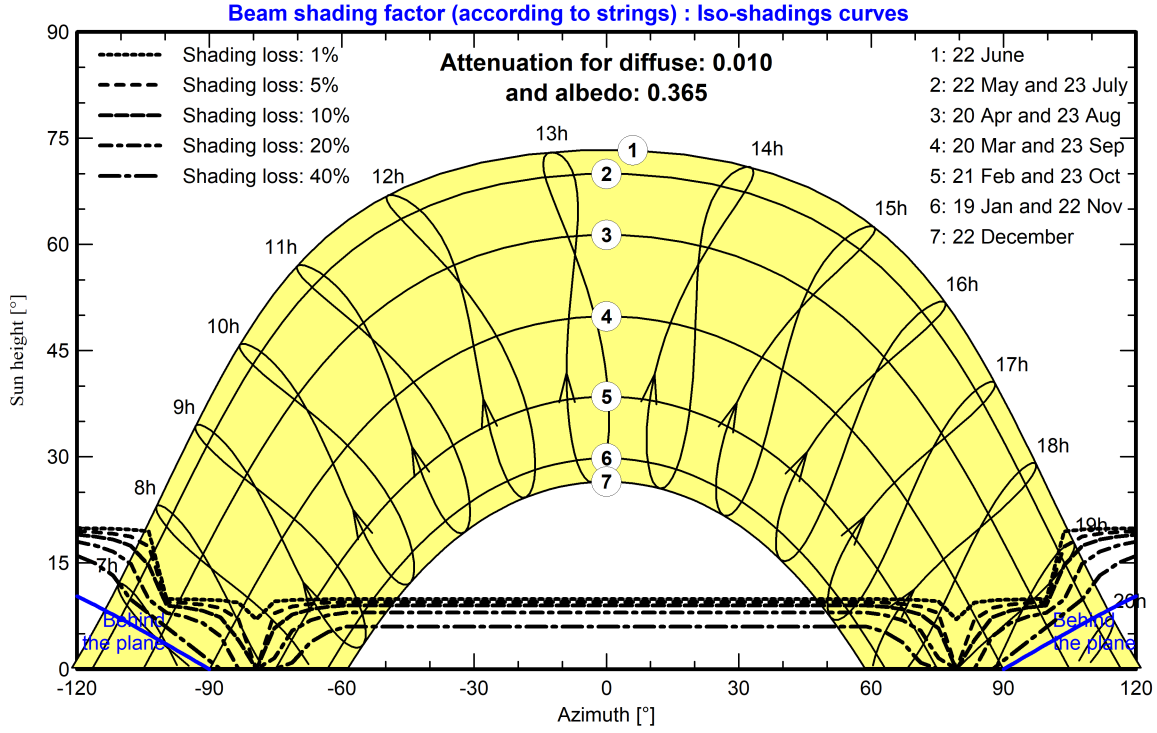
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1 - Fixed plane, Tilts/azimuths: 20°/ 0°

Beam shading factor (according to strings) : Iso-shadings curves



PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
01/08/26 14:57
with V8.1.4

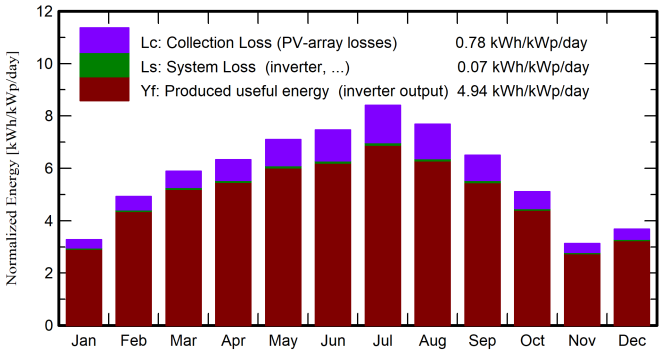
Main results

Simulation step
Hourly

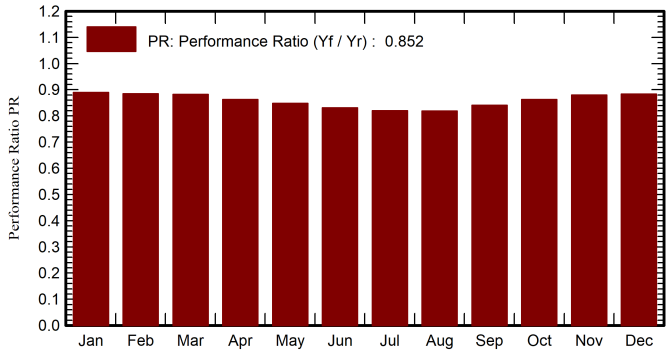
System Production

Produced Energy	178534 kWh/year	Specific production	1803 kWh/kWp/year
		Perf. Ratio PR	85.19 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	68.7	26.62	5.27	101.6	96.0	9104	8953	0.890
February	99.5	27.86	8.60	138.1	131.2	12260	12084	0.884
March	150.4	50.00	8.81	182.8	173.8	16205	15972	0.883
April	174.9	65.23	13.85	190.1	180.4	16488	16244	0.863
May	214.5	69.70	17.90	220.2	209.1	18763	18488	0.848
June	224.9	70.78	23.35	223.8	212.3	18704	18420	0.831
July	258.6	55.26	26.31	260.6	247.3	21449	21144	0.820
August	222.1	57.61	28.26	238.2	226.5	19577	19304	0.819
September	167.2	48.72	22.28	195.1	185.8	16470	16233	0.840
October	121.4	40.28	16.35	158.3	150.5	13725	13523	0.863
November	67.7	31.62	10.67	93.9	88.9	8326	8184	0.880
December	71.0	22.99	4.50	114.2	107.5	10138	9982	0.883
Year	1840.9	566.69	15.55	2116.9	2009.3	181209	178534	0.852

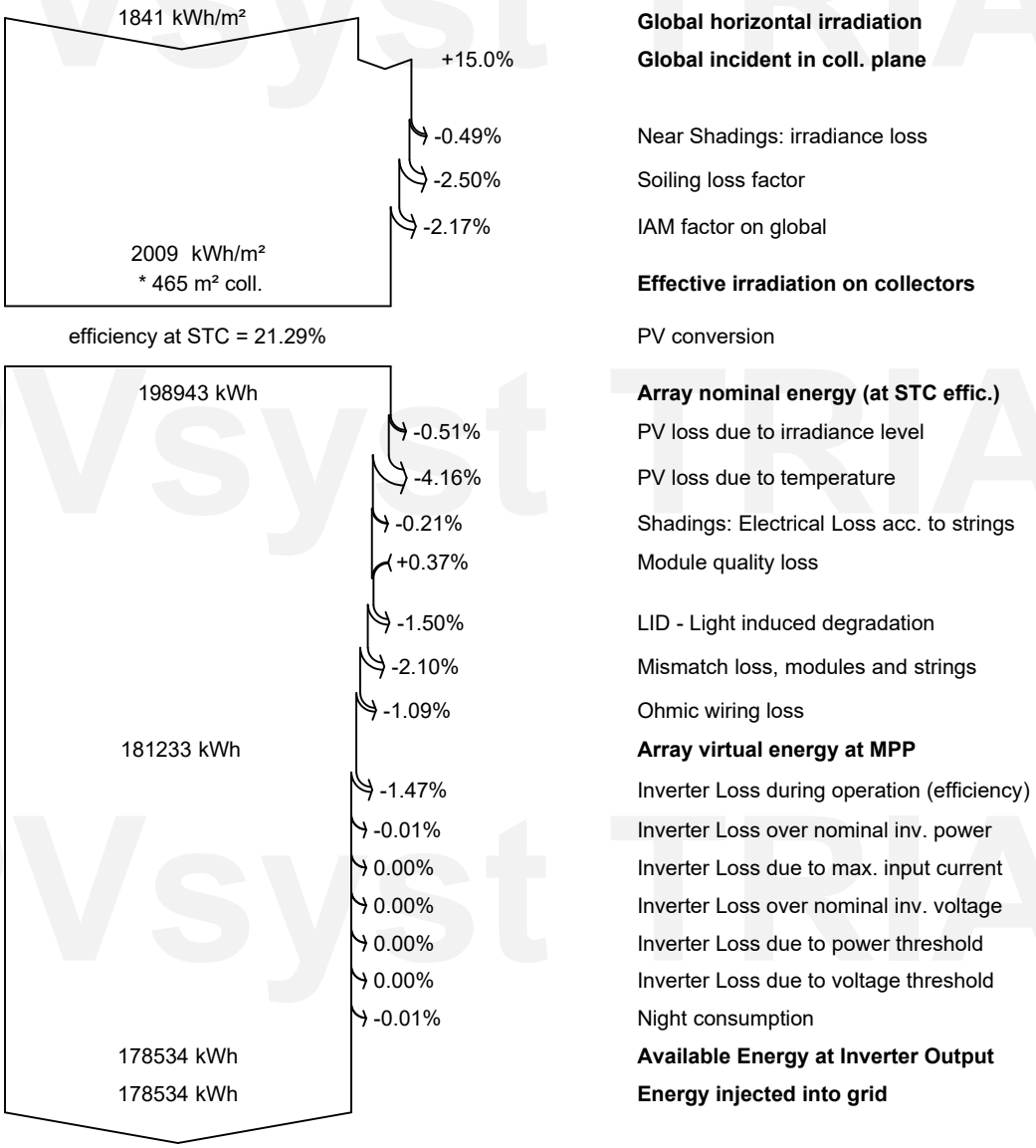
Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

PVsyst TRIAL

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
01/08/26 14:57
with V8.1.4

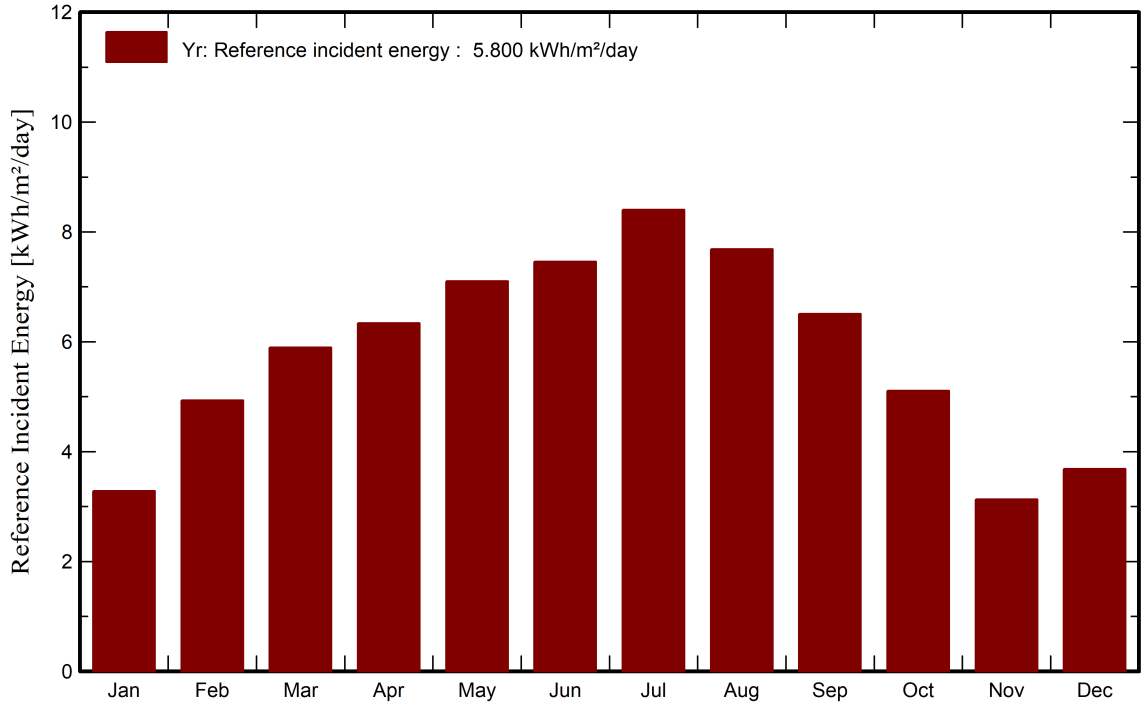
Loss diagram



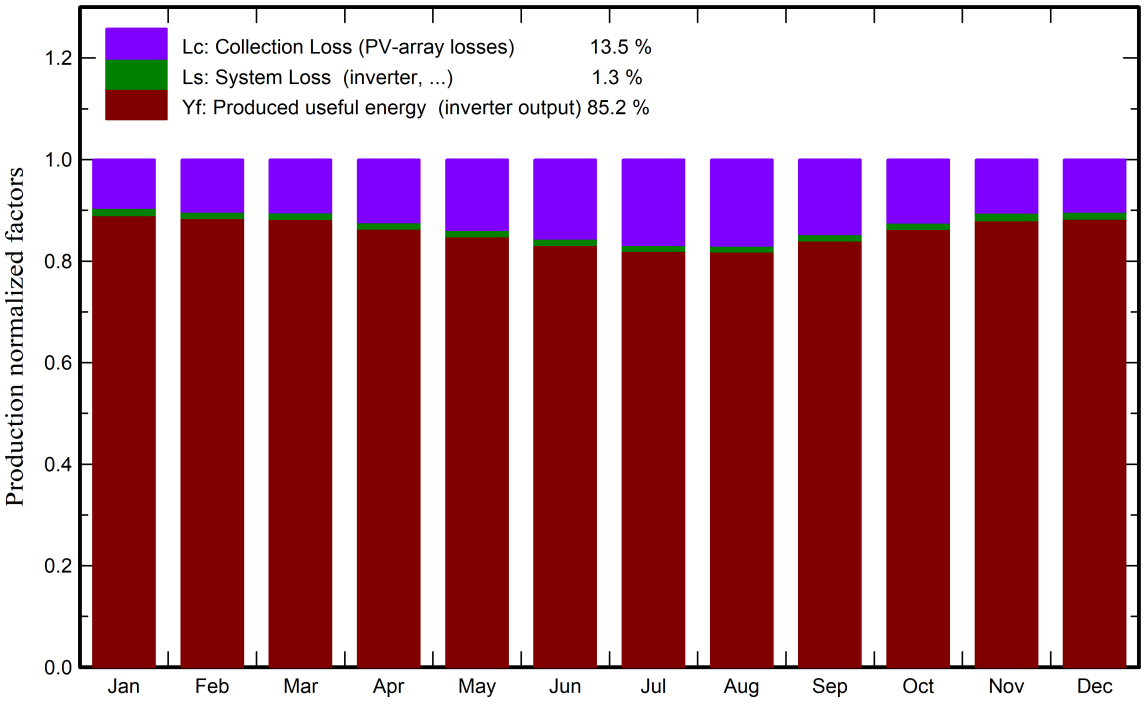
PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
01/08/26 14:57
with V8.1.4

Predef. graphs

Reference Incident Energy in Collector Plane



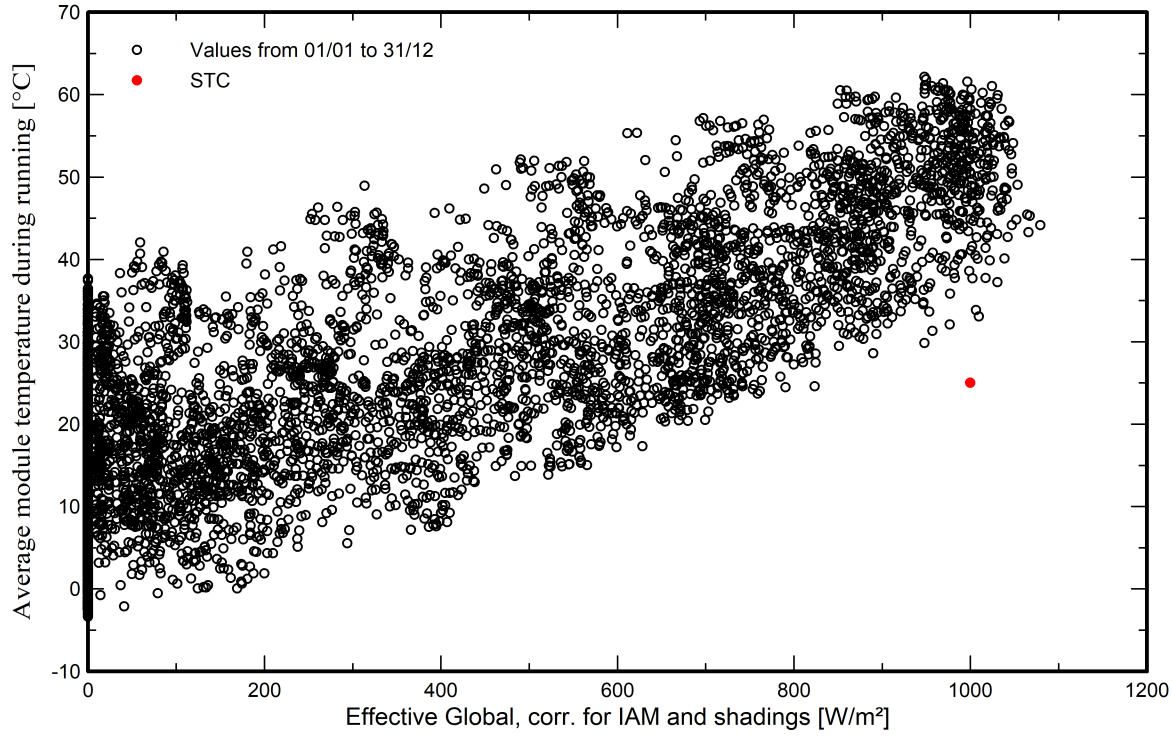
Normalized Production and Loss Factors



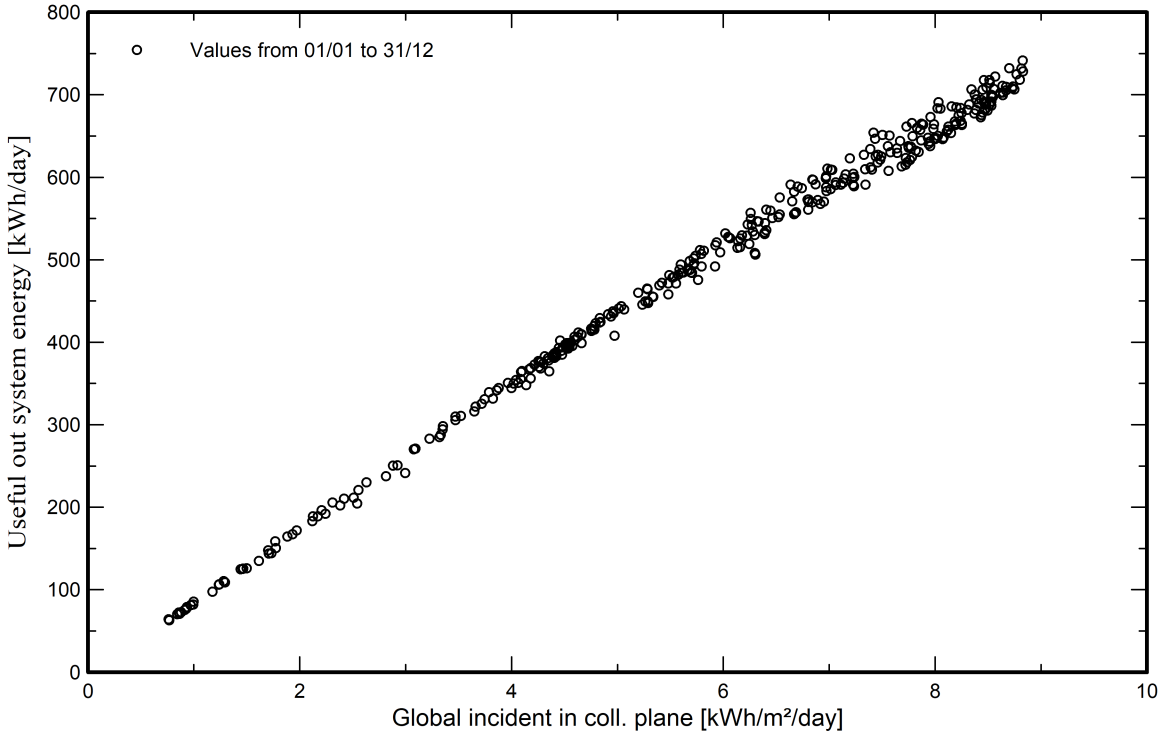
PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
01/08/26 14:57
with V8.1.4

Predef. graphs

Array Temperature vs. Effective Irradiance



Daily Input/Output diagram

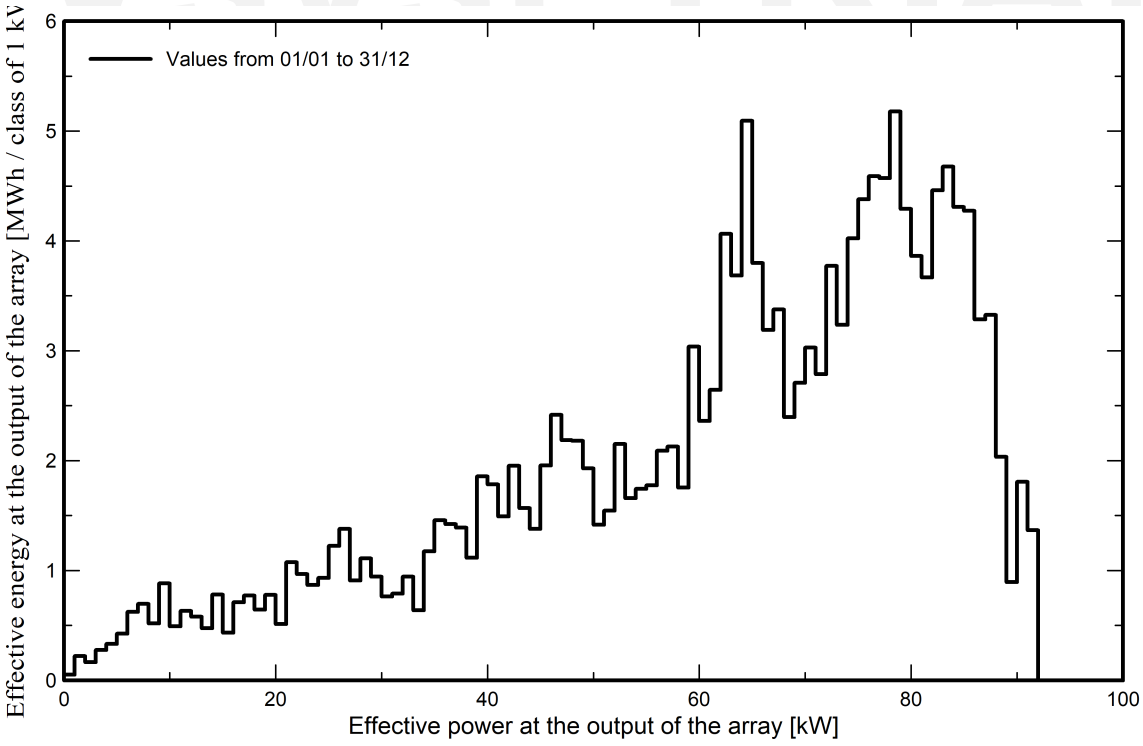


PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
01/08/26 14:57
with V8.1.4

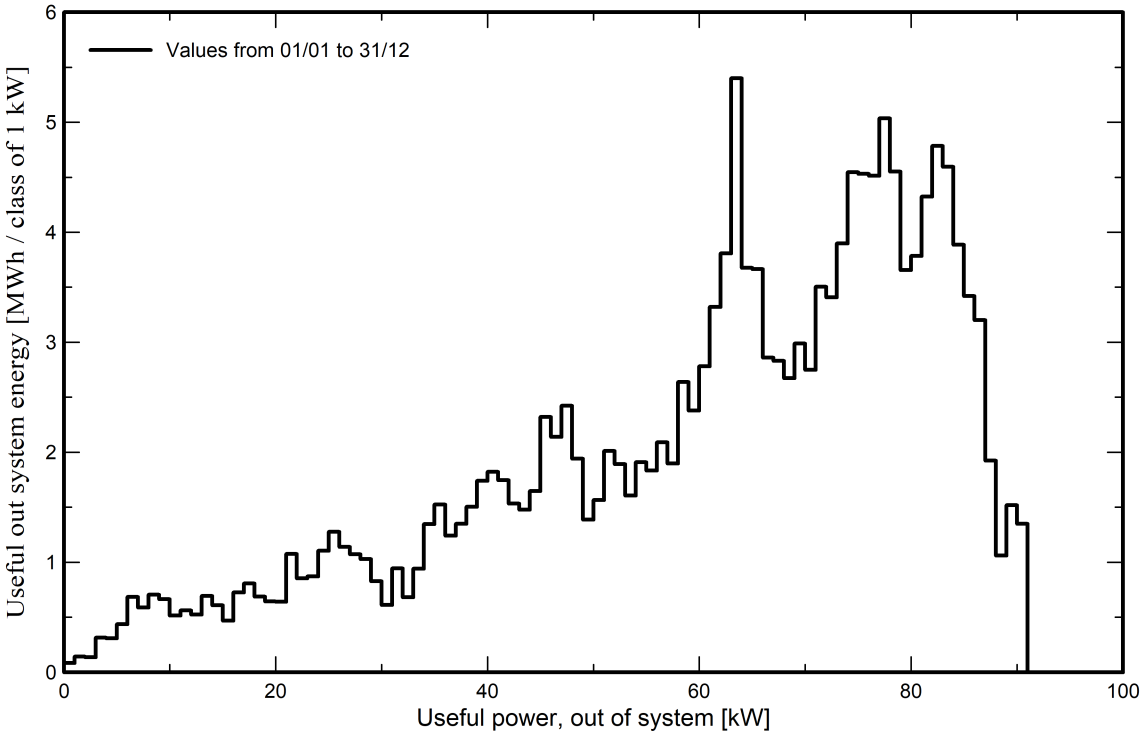
PVsyst TRIAL

Predef. graphs

Array Power Distribution

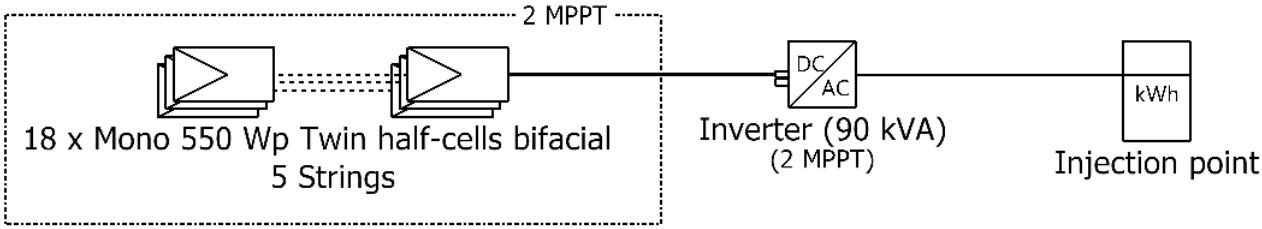


System Output Power Distribution



Single-line diagram

PVsyst V8.1.4
VC0, Simulation date:
01/08/26 14:57
with V8.1.4



PV module	Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial
Inverter	90 kWac inverter
String	18 x Mono 550 Wp Twin half-cells bifacial

	Análisis APV alta2	
	VC0 : Simulación Idoneidad Muy Alta	01/08/26