



**Evaluación técnica de sistemas agrovoltaicos para cultivos agrícolas extensivos en zonas rurales del Valle del Cauca**

Luis Tadeo Perdomo Buriticá

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Eficiencia Energética

Asesor

Sergio Cipriano Agudelo Flórez, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Especialización en Eficiencia Energética  
Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	Perdomo Buriticá [1]
<b>Referencia</b> Estilo IEEE (2020)	L. T. Perdomo Buriticá, “Evaluación técnica de sistemas agrovoltaicos para cultivos agrícolas extensivos en zonas rurales del Valle del Cauca”, Trabajo de grado especialización, Especialización en Eficiencia Energética, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.



Especialización en Eficiencia Energética, Cohorte II.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT .....	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
III. JUSTIFICACIÓN.....	14
IV. OBJETIVOS .....	15
V. MARCO TEÓRICO.....	16
A. Definiciones generales .....	16
1) Actividad agrícola.....	16
2) Sistema fotovoltaico .....	16
3) Instalación fotovoltaica de referencia.....	16
4) Sistema agrovoltaico.....	17
5) Potencia nominal AC de una instalación fotovoltaica.....	17
6) Potencia nominal DC de una instalación agrovoltaica .....	17
7) Producción específica de un sistema fotovoltaico .....	17
B. Definición de áreas o superficies agrícolas.....	18
1) Superficies nulas u otras superficies ( $S_N$ ).....	19
2) Superficie Agrícola Utilizada (SAU) .....	20
3) Superficie del sistema agrovoltaico ( $S_{tot}$ ).....	20
4) Superficie dedicada a la actividad agrícola ( $S_{agricola}$ ).....	20
5) Superficie total de los módulos fotovoltaicos ( $S_{pv}$ ).....	20
6) Superficie total con elementos propios del sistema agrovoltaico ( $S_{apv}$ ).....	21
7) Ratio de ocupación del suelo (ROS).....	21

---

C. Criterios de evaluación técnica .....	21
1) Criterio de evaluación 1 .....	22
2) Criterio de evaluación 2 .....	22
3) Criterio de evaluación 3 .....	23
VI. METODOLOGÍA .....	24
A. Diseño técnico de la planta .....	25
B. Identificación y cálculo de áreas .....	26
C. Cálculo de la superficie del sistema de paneles solares ( $S_{apv7}$ ) .....	28
VII. EVALUACIÓN DE CRITERIOS .....	32
A. Comprobación del criterio de evaluación 1 .....	32
B. Comprobación del criterio de evaluación 2 .....	32
C. Comprobación del criterio de evaluación 3 .....	32
VIII. RESULTADOS .....	38
IX. CONCLUSIONES .....	39
BIBLIOGRAFÍA .....	42

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1.....	25
TABLA 2.....	33
TABLA 3.....	38

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Lugar del emplazamiento de estudio. (Fuente: PVsyst) .....	11
Fig. 2. Condiciones meteorológicas (Fuente: Base de datos de Meteonorm) .....	12
Fig. 3. Identificación de las distintas superficies de interés para el sistema agrovoltaico .....	19
Fig. 4. Vista en superior de la implantación agrovoltaica. ....	24
Fig. 5. Plantación entre fila de seguidores (vista frontal).....	25
Fig. 6. Plantación entre fila de seguidores (vista superior) .....	26
Fig. 7. Identificación de elementos y superficies de la planta agrovoltaica. ....	27
Fig. 8. Detalle con la ubicación de las polilíneas en PVcase (Zonas de estudio) .....	27
Fig. 9. Proyección del seguidor solar a 60° en vista lateral .....	29
Fig. 10. Modelamiento en PVsyst para determinar sombreados cercanos.....	33
Fig. 11. Resultados de simulación en PVsyst para la configuración agrovoltaica (seguidor solar) .....	34
Fig. 10. Resultados de simulación en PVsyst para la configuración estándar 1 (seguidor solar).35	
Fig. 11. Resultados de simulación en PVsyst para la configuración estándar 2 (mesas fijas).....	36

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>AC</b>	Corriente Alterna
<b>CEI</b>	Comitato Elettotecnico Italiano
<b>DC</b>	Corriente Directa
<b>GCR</b>	Grounding Cover Ratio
<b>PAS</b>	Public Available Specification
<b>SAU</b>	Superficie Agrícola Utilizada
<b>S<sub>ag</sub></b>	Superficie para propósitos Agrícolas dentro del vallado
<b>S<sub>agricola</sub></b>	Superficie dedicada a la actividad Agrícola
<b>S<sub>apv</sub></b>	Superficie total con elementos propios del sistema Agrovoltáico
<b>S<sub>N</sub></b>	Superficies nulas u otras superficies
<b>S<sub>pv</sub></b>	Superficie total de los módulos fotovoltaicos
<b>S<sub>tot</sub></b>	Superficie del sistema Agrovoltáico
<b>ROS</b>	Ratio de Ocupación del Suelo
<b>PE<sub>agro</sub></b>	Producción específica del sistema solar agrovoltáico en MWh/ha/año
<b>PE<sub>estd</sub></b>	Producción específica del sistema solar estándar en MWh/ha/año

---

## RESUMEN

El campo de aplicación del documento que se pretende mostrar está basado en las plantas agrovoltaicas tal y como se definen a continuación. Si bien no se pretende entrar en los requisitos para acceder a los incentivos que ofrecen las entidades gubernamentales u otros organismos públicos, ni de detallar el dimensionamiento de equipos y lotes, si trata de ahondar en un modelo que viabilice las prácticas agrícolas en Colombia, así como su producción energética en zonas con grandes extensiones de tierra, logrando obtener el mejor aprovechamiento de ambos subsistemas.

El objetivo principal de este documento es proporcionar una metodología basada en la práctica del diseño de sistemas agrovoltaicos en Italia, la cual últimamente viene desarrollando grandes avances en métodos y modelos de cálculo para este tipo de plantas, orientada a identificar las características principales y sus componentes, así como sus diferencias con los sistemas fotovoltaicos tradicionales.

Seguidamente, se muestra el método de cálculo propuesto para un proyecto en el Valle del Cauca en donde se evidencia los conceptos que a continuación se desarrollarán.

***Palabras clave* — Diseño agrovoltaico, producción energética, metodología italiana, sistemas fotovoltaicos.**



## ABSTRACT

The scope of the document to be presented is based on agrovoltaic systems, as defined below. While there is no intention to delve into the requirements for accessing incentives offered by government entities or other public organizations, nor to detail the sizing of equipment and lots, the aim is to explore a model that enables agricultural practices in Colombia and their energy production in areas with large land extensions, achieving the optimal utilization of both subsystems.

The main objective of this document is to provide a methodology based on the practice of designing agrovoltaic systems in Italy, which has recently made significant advances in methods and calculation models for such plants. This methodology is geared towards identifying the main characteristics and components of agrovoltaic systems, as well as highlighting their differences from traditional photovoltaic systems.

Subsequently, the proposed calculation method for a project in the Valle del Cauca is presented, where the concepts outlined below will be further developed.

***Keywords*** — **Agrovoltaic design, energy production, Italian methodology, photovoltaic systems.**

## I. INTRODUCCIÓN

En respuesta a los desafíos contemporáneos de la agricultura, como la sostenibilidad energética y la optimización de recursos, ha venido surgiendo una vertiente que combinan la producción agrícola con la generación de energía solar, representando una convergencia inteligente entre la agricultura tradicional y la tecnología renovable: Los sistemas agrovoltaicos.

En el contexto del Valle del Cauca, donde la radiación solar es abundante al igual que las tierras para la producción agrícola, los sistemas agrovoltaicos extensivos emergen como una alternativa prometedora para impulsar la productividad y la resiliencia del sector agrícola, tomando como referencia los reglamentos y normatividades italianas, que con su rica historia agrícola y compromiso con la innovación sostenible, ha emergido como un escenario propicio para la implementación de diseños avanzados de sistemas agrovoltaicos a nivel mundial, en el que se han elaborado criterios en conjunto con el MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA – DIPARTIMENTO PER L'ENERGIA de Italia, pretendiendo clarificar las características y requisitos mínimos que debe reunir una planta fotovoltaica para ser definida como agrovoltaicas. [1]

Este matrimonio entre la agricultura y la energía solar no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también diversifica las fuentes de ingresos para los agricultores, fortaleciendo la sostenibilidad económica de la región, presentando una respuesta visionaria a los desafíos contemporáneos que enfrenta la agricultura y la necesidad de una transición energética hacia fuentes más limpias y sostenibles.

A lo largo de este trabajo se examinarán algunos criterios de diseño adoptados en los sistemas agrovoltaicos extensivos en Italia basados en la *Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici (Directrices sobre Sistemas agrovoltaicos)*, en el que además se hará uso del software especializado para la simulación de producción energética de granjas solares (PVsyst) [2] y el uso de herramientas de dibujo técnico para parque solares (PVcase) [3]. Asimismo, se abordará el desafío específico de una planta ubicada en Palmira, Valle del Cauca, en la que se logre aplicar dichos criterios, buscando así, dar posibles soluciones para el futuro agrícola en la transición energética del país.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia cuenta con una diversidad climática y geográfica que favorece la producción de una amplia variedad de cultivos, tales como café, banano, plátano, flores, palma de aceite, caña de azúcar, cacao, arroz, maíz, papa, entre otros.

Así mismo, existen zonas rurales que facilitan la actividad agrícola para los cultivos tradicionales en Colombia, pero que de una u otra forma no tienen facilidades para el aprovechamiento máximo de los terrenos como por ejemplo el exceso de irradiación para algunas zonas del suroeste del Colombia, entre las cuales se encuentra el Valle del Cauca, principal departamento agrícola del país, cuyas hectáreas rondan los 708.000 para uso agrícola y casi 600.000 hacen parte del grupo pecuario, de un total de 2.119.000 hectáreas (ha) de las que dispone el departamento. [4]

Este fenómeno de la irradiación en algunas zonas se puede aprovechar, pues Colombia, al estar ubicada cerca del ecuador, cuenta con un alto potencial para la irradiación solar en gran parte de su territorio. Sin embargo, hay regiones que se destacan por tener condiciones particularmente favorables para la captación de energía solar, entre ellas el valle del cauca.

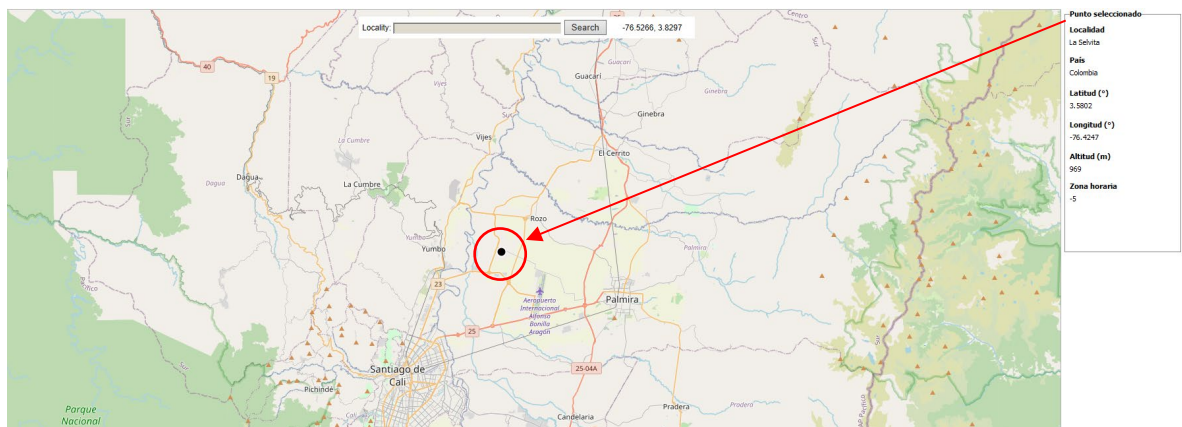


Fig. 1. Lugar del emplazamiento de estudio. (Fuente: PVsyst)

Para la evaluación energética del proyecto se utilizan datos meteorológicos de Meteonorm [5], que incluyen:

- ✓ Datos precisos de radiación por satélite registrados durante el periodo 1991-2010

- ✓ Temperaturas obtenidas interpolando los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas al emplazamiento.

El emplazamiento considerado se caracteriza por los siguientes datos: irradiancia difusa y global, temperatura, precipitaciones, insolación anual difusa y global.

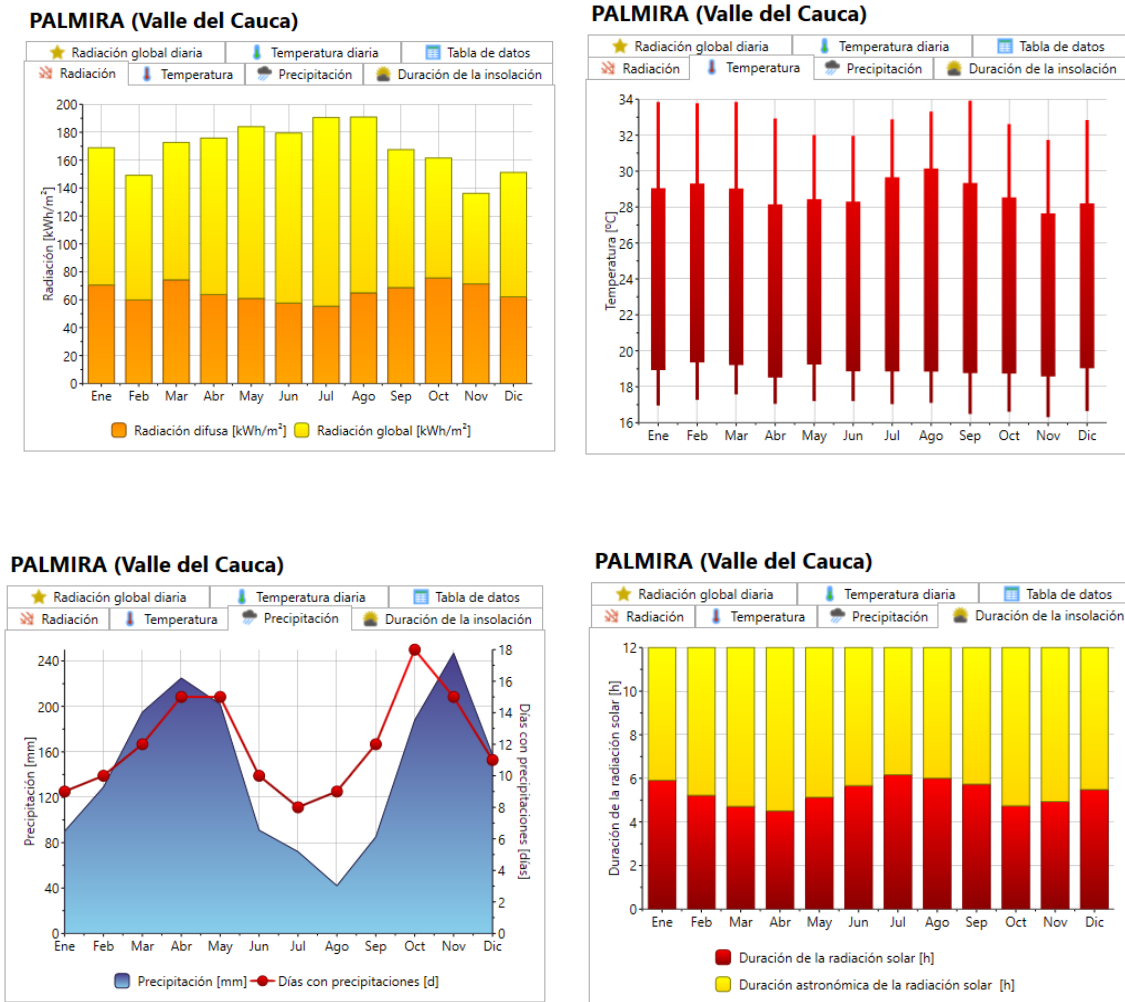


Fig. 2. Condiciones meteorológicas (Fuente: Base de datos de Meteonorm) [5]

Dado que el Valle del Cauca se encuentra en una región tropical, generalmente experimenta altos niveles de radiación solar a lo largo del año, llegando a tener un aproximado de 2100 kWh/m<sup>2</sup> al año, mientras que las precipitaciones varían según la temporada. Hay una temporada de lluvias que suele ocurrir de febrero a mayo y de octubre a diciembre y una temporada seca desde junio a

septiembre. Las temperaturas pueden variar dependiendo de la altitud y la ubicación específica en el valle.

Un estudio realizado mediante simulaciones a largo plazo en parques solares al norte de Italia en el que se comparó cultivos de maíz seco con sistemas agrovoltaicos y cultivos del maíz seco en campos abiertos, se concluyó que el rendimiento medio del maíz de seco fue mayor y más estable bajo sistemas agrovoltaicos que en condiciones de plena luz. Esto indica que, los sistemas agrovoltaicos pueden contribuir al rendimiento de los cultivos y a la producción de energía limpia. [6]

A raíz de las consideraciones anteriormente mencionadas, es posible tener una solución que facilite el aprovechamiento de grandes extensiones de terreno mediante la construcción de sistemas agrovoltaicos que aprovechen las condiciones de producción agrícola, así como de energía eléctrica evaluando la viabilidad para ciertos grupos de cultivos típicos de la zona.

Es importante tener en cuenta que, si bien estas áreas pueden tener un alto potencial de irradiación solar, otros factores como la topografía, la altitud y las condiciones climáticas locales también pueden influir en la eficiencia de los sistemas solares. Además, el desarrollo de proyectos solares también está sujeto a consideraciones económicas, normativas y de infraestructura.

### III. JUSTIFICACIÓN

Es evidente que la transición energética juega un papel importante en el desarrollo de tecnologías que ayuden a mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> incluida Colombia, que al año 2021, de acuerdo con estudios de FEDESARROLLO, las actividades agropecuarias tenían una participación en emisiones del 22%. [7]

Italia, por ejemplo, pretende reforzar el papel estratégico del sector agrícola, alimentario y forestal en el complejo sistema económico nacional y en el contexto europeo e internacional, partiendo de los territorios donde se concentran actividades agrícolas. Por lo tanto, es necesario que la sostenibilidad y la inclusión se conviertan en palancas de la competitividad a nivel sectorial y territorial. [8]

Frente a este panorama, la inclusión de proyectos agrovoltaicos en Colombia, y sobre todo en el Valle del Cauca que cuenta con grandes extensiones de tierra para uso agrícola, se pueden justificar desde diversas perspectivas, entre las cuales está la diversificación de ingresos para agricultores, fomentar el desarrollo sostenible en áreas rurales al proporcionar empleo local y optimización del uso de suelos.

Si se revisa las actividades agrícolas a nivel de Sudamérica, Colombia está dentro de los principales países con actividades agrícolas importantes, en donde el 38,59% de las tierras colombianas están destinadas a la agricultura, siendo uno de los países con mayor densidad poblacional. [9]

## IV. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Evaluar la viabilidad y adaptabilidad en la implementación de sistemas agrovoltáicos en cultivos agrícolas extensivos, con el fin de promover prácticas sostenibles y mejorar la productividad agrícola en zonas rurales del Valle del Cauca.

### *B. Objetivos específicos*

- ✓ Establecer métodos de diseño europeos que faciliten la implementación y viabilización de proyectos de generación agrovoltáica en Colombia para el sector agrícola y rural.
- ✓ Evaluar la producción específica de sistemas agrovoltáicos mediante seguidores solares en comparación con modelos tradicionales de sistemas fotovoltaicos mediante mesas fijas y seguidores.
- ✓ Realizar un análisis de la radiación solar y las condiciones climáticas específicas en el Valle del Cauca para determinar la idoneidad de los sistemas agrovoltáicos.
- ✓ Adaptar los criterios de diseño europeos a las condiciones específicas del Valle del Cauca, considerando factores climáticos, geográficos y agronómicos para garantizar la aplicabilidad local de los sistemas agrovoltáicos.

## V. MARCO TEÓRICO

### *A. Definiciones generales*

Si bien existen diversidad de artículos y normas europeas que describen las características y modos de diseño de un sistema agrovoltaico, muchas de las definiciones que a continuación se describen obedecen a la norma italiana CEI PAS 82-93 *Impianti Agrivoltaici* [10], la cual es de carácter experimental y proporciona una orientación sobre la caracterización de plantas agrovoltaicas y fotovoltaicas. Además, aborda la clasificación de los distintos tipos de plantas agrovoltaicas y sus requisitos básicos.

#### *1) Actividad agrícola*

Se refiere a la producción, cría o cultivo de productos agrícolas, incluidas la recolección, el ordeño, la cría y el mantenimiento de animales con fines agrícolas, así como cualquier otra actividad realizada por el agricultor. [10]

#### *2) Sistema fotovoltaico*

Conjunto de componentes que producen y suministran electricidad obtenida mediante el efecto fotovoltaico, principalmente compuesta por módulos fotovoltaicos e inversores, que permiten producir energía eléctrica y suministrarla a consumidores eléctricos de AC o DC y/o inyectar a la red de distribución o transmisión. y/o inyectarla en la red de distribución o transmisión. [9]

#### *3) Instalación fotovoltaica de referencia*

Instalación fotovoltaica compuesta por módulos sobre soportes fijos orientados al sur (Azimut=0) e inclinados un ángulo que depende de la latitud, en el mismo emplazamiento que la instalación agrovoltaica con la que se va a comparar. [10]



#### 4) *Sistema agrovoltaico*

Sistema fotovoltaico que adopta soluciones necesarias para el desarrollo de actividades agrícolas, ya sea mediante módulos montados sobre estructuras fijas o sobre estructuras que permiten la rotación de los propios módulos (seguidores), de forma que no se ponga en peligro la continuidad de las actividades agrícolas que se desarrollan bajo y/o entre las estructuras de soporte de los módulos fotovoltaicos y que, mediante la acción combinada de la actividad agraria y la producción de electricidad, pretende aprovechar el potencial productivo de ambos subsistemas. [10]

#### 5) *Potencia nominal AC de una instalación fotovoltaica*

Es la suma de la potencia nominal del inversor o inversores del sistema de conversión CC/CA, a una temperatura de funcionamiento especificada. [10]

#### 6) *Potencia nominal DC de una instalación agrovoltaica*

Es la suma de la potencia pico nominal de la cantidad de módulos fotovoltaicos en condiciones estándar de funcionamiento. [10]

#### 7) *Producción específica de un sistema fotovoltaico*

Energía eléctrica que puede producir la instalación fotovoltaica mediante el programa PVsyst [2], proporcionando los siguientes datos de entrada:

- Ubicación: Coordenadas geográficas del lugar de instalación del sistema agrovoltaico
- Potencia DC (kWp): Suma de la potencia nominal en STC de los módulos fotovoltaicos del sistema agrovoltaico
- Pérdidas del sistema: Típicas (sugeridas por el software)
- Montaje de estructura: En suelo
- Opciones de montaje: En estructura fija o seguidores.
- Orientación: En estructura fija (Azimut=0) o seguidores (Eje N-S)

Además de estos datos de entrada, hay que tener en cuenta que, como buena práctica de diseño, la instalación fotovoltaica de referencia adoptará una distancia entre filas de seguidores tal que no haya sombreado mutuo entre módulos.

Para este caso se utiliza un indicador llamado GCR (Grounding Cover Ratio), el cual permite inferir el porcentaje de sombreado de la planta, definido por la siguiente expresión:

$$GCR = \frac{\text{Superficie de ocupación de los módulos fotovoltaicos}}{\text{Superficie de ocupación del suelo}} \quad (1)$$

En la práctica se suele utilizar rangos para estimar si el GCR es bueno o malo, así:

- ✓ Sistema con mesas fijas: Variación entre 65% - 68%
- ✓ Sistema con seguidores: Variación entre 38% - 43%

Se ha logrado corroborar que las plantas con una potencia instalada mayor a 10 MWp (potencia DC) suelen presentar producciones bajas relacionadas por pérdidas por sombreado mutuo, o lo que comúnmente se conoce como efecto eléctrico, llegando a presentar un porcentaje de pérdidas elevado en comparación con otras pérdidas del sistema cuando se supera el 68% en mesas fijas y 43% en seguidores solares. Sin embargo, se ha mencionado que los valores típicos pueden ser entre 40% - 60%. [11]

Estas variaciones también dependen de la ganancia del sistema, en donde la ganancia esperada del seguidor siempre será mayor que la ganancia con mesas fijas debido a la sensibilidad de los seguidores en latitudes cercanas al ecuador. [11]

Aun así, este criterio puede ser bastante restrictivo cuando se tienen áreas con límites definidos cuando se busca llegar a una potencia objetivo. En este sentido los porcentajes pueden ser mayores o menores.

### *B. Definición de áreas o superficies agrícolas*

A continuación, se describen los parámetros que caracterizan las instalaciones agrovoltaicas y las distintas categorías de superficies que intervienen en la estimación del diseño, como lo muestra la Fig. 3.

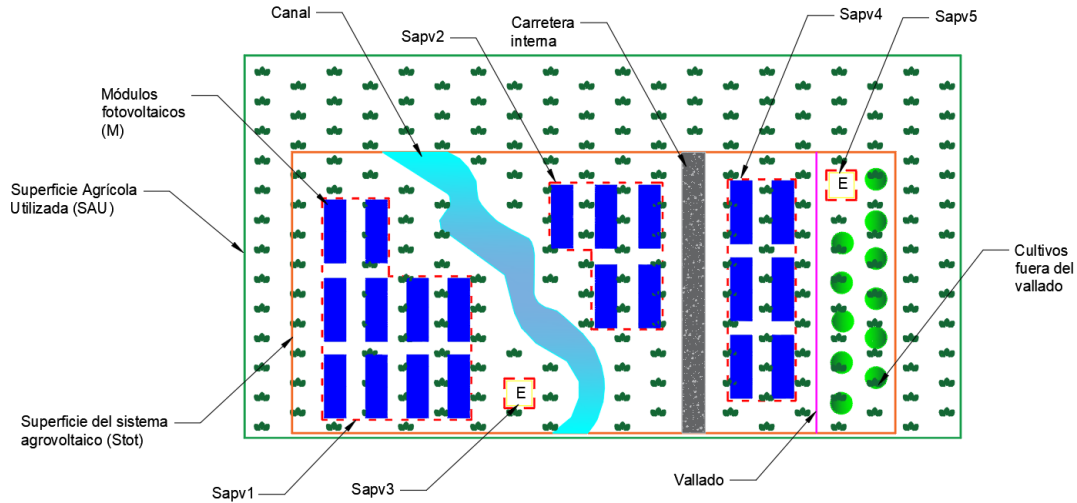


Fig. 3. Identificación de las distintas superficies de interés para el sistema agrovoltáico

- ✓  $SAU$  = Superficie Agrícola Utilizada
- ✓  $S_{tot}$  = Superficie del sistema agrovoltáico. No incluye el canal y la carretera interna (Superficies nulas)
- ✓  $S_{apv}$  = Superficie total con elementos propios del sistema agrovoltáico. En este caso, consta de 5 zonas que incluyen áreas con módulos fotovoltaicos (M) y equipos eléctricos (E), es decir,

$$S_{apv} = S_{apv-1} + S_{apv-2} + S_{apv-3} + S_{apv-4} + S_{apv-5} \quad (2)$$

$$S_{apv} = \sum S_{apv-n} \quad (3)$$

### 1) Superficies nulas u otras superficies ( $S_N$ )

Superficies que no implican directamente una actividad agrícola, tales como caminos agrícolas, zanjas, canales, estanques, etc. [1], [10]

## 2) *Superficie Agrícola Utilizada (SAU)*

Esta incluye tierras para la labor agrícola, prados y pastos, cultivos y otras tierras agrícolas utilizadas, incluyendo además la superficie de las plantaciones agrícolas en fase de plantación. [1], [10]

## 3) *Superficie del sistema agrovoltaico ( $S_{tot}$ )*

Es una parte de la superficie agrícola utilizada ( $SAU$ ) que incluye tanto la superficie utilizada para los cultivos con la instalación agrovoltaica como la superficie total con elementos propios del sistema agrovoltaico ( $S_{apv}$ ). [1], [10]

El  $S_{tot}$  comprende una zona libre para la actividad agrícola ( $S_{agricola}$ ) y una parte no utilizada para la actividad agrícola ( $S_N$ ), es decir:

$$S_{tot} = S_{agricola} + S_N \quad (4)$$

## 4) *Superficie dedicada a la actividad agrícola ( $S_{agricola}$ )*

En este sentido,  $S_{agricola}$  constituye la superficie que, tras la instalación del sistema agrovoltaico, sigue utilizándose para la actividad agrícola [1], [10]. Por tanto, la expresión anterior podría presentarse como:

$$S_{agricola} = S_{tot} - S_N \quad (5)$$

La zona  $S_N$  no se utiliza para actividades agrícolas porque está ocupada o impedida por la instalación y el funcionamiento de los diversos componentes de la planta agrovoltaica. [1], [10]

## 5) *Superficie total de los módulos fotovoltaicos ( $S_{pv}$ )*

El  $S_{pv}$  es la suma de las superficies identificadas por la proyección sobre el suelo de los módulos fotovoltaicos que conforman la instalación. [1], [10]

En el caso del uso de sistemas de seguimiento solar, la superficie total de los módulos fotovoltaicos se toma como la proyección sobre el suelo de los módulos colocados en posición horizontal. [1], [10]

6) *Superficie total con elementos propios del sistema agrovoltaiico ( $S_{apv}$ )*

La  $S_{apv}$  es el área delimitada los equipos eléctricos propios que conforman la instalación del sistema agrovoltaiico, tales como subestaciones, inversores o cualquier equipo eléctrico en la que también se incluye la proyección sobre el suelo de los módulos fotovoltaicos que conforman la instalación, incluidos los espacios entre las filas de módulos fotovoltaicos. [1], [10]

La  $S_{apv}$  puede fragmentarse en varias zonas debido a la presencia de superficies nulas (canales, carreteras, etc.), por lo que la ecuación 5 puede tomar la siguiente forma:

$$S_{agricola} = S_{tot} - S_{apv} - S_N \quad (6)$$

7) *Ratio de ocupación del suelo (ROS)*

Relación entre la superficie total ocupada por los módulos fotovoltaicos de un sistema agrovoltaiico ( $S_{pv}$ ) y la superficie total ocupada por el sistema agrovoltaiico ( $SAU$ ). El valor se expresa en porcentaje [1]

$$ROS = \frac{S_{pv}}{SAU} \quad (7)$$

C. *Criterios de evaluación técnica*

Existen ciertas condiciones o criterios para que la planta agrovoltaiica llegue a ser viable técnicamente. En primer lugar, las condiciones propias del lugar deben ser aptas para la instalación (condiciones meteorológicas, predios o parcelas con fines agrícolas debidamente delimitados, necesidades propias de la red eléctrica, etc.).

En segundo lugar, para la aplicación de la metodología la planta debe tener las características propias de un sistema “Agrovoltaiico”, mediante una configuración y elementos que permitan la integración de actividades agrícolas y la producción de electricidad.

### 1) *Criterio de evaluación 1*

Un parámetro fundamental para la calificación de una instalación agrovoltaica, es la continuidad de la actividad agraria, dado que las normas y leyes limitan las instalaciones a terrenos con vocación agraria, [12] y, que, de acuerdo con las buenas prácticas agrícolas contempladas en dichas normas, exigen un porcentaje de tierras tal que no se eliminen o se vean afectadas las actividades relacionadas con la agricultura.

Esta condición se satisface cuando la superficie sujeta a intervención se asigna de manera significativa al cultivo agrícola a lo largo de la vida técnica de la instalación agrovoltaica. En consecuencia, en las áreas sujetas a intervenir, se debe asegurar que al menos el 70% de la superficie esté destinado a la actividad agrícola. Por lo tanto, es imperativo que:

$$S_{agricola} \geq 0.7 SAU$$

$$\frac{S_{agricola}}{SAU} \geq 70\% \quad (8)$$

### 2) *Criterio de evaluación 2*

Se pueden emplear métricas como por ejemplo la densidad de potencia (MW/ha) o el porcentaje de la superficie total ocupada por los módulos para evaluar la concentración de un sistema fotovoltaico en relación con la ubicación de la instalación.

En la primera fase del desarrollo fotovoltaico en Italia (de 2010 a 2013), la densidad de potencia media de las instalaciones en tierra era de unos 0,6 MW/ha, en relación con módulos fotovoltaicos con una densidad de unos 8 m<sup>2</sup>/kW (por ejemplo, módulos individuales de 210 W por 1,7 m<sup>2</sup>). Normalmente, teniendo en cuenta el espacio entre las cadenas necesarias para evitar el sombreado y favorecer la circulación del aire, esto se traduce en un porcentaje de la superficie ocupada por los módulos de aproximadamente el 50%. [12] En la actualidad este porcentaje se sigue conservado si se comparan módulos de potencias y dimensiones mayores.

Con el objetivo de establecer un umbral para este indicador y con el objetivo de no limitar la implementación de soluciones especialmente innovadoras y eficientes, se propuso la adopción de un límite máximo del 40% para el porcentaje de la Superficie Agrícola Utilizada (*SAU*)

$$S_{pv} \leq 0.4 SAU$$

$$\frac{S_{pv}}{SAU} \leq 40\% \quad (9)$$

El valor de  $S_{pv}$  se puede sacar fácilmente de las fichas técnicas de los paneles, tomando el área del panel y multiplicándolo por el número de paneles totales del sistema.

### 3) Criterio de evaluación 3

Examinando las particularidades de los sistemas agrovoltaicos, se sostiene que la producción específica de un sistema agrovoltaico debidamente diseñado, al ser comparada con la producción específica de referencia de un sistema fotovoltaico convencional, no debería ser menor al 60 % de esta última. [12]

$$PE_{agro} \geq 0.6 PE_{estd}$$

$$\frac{PE_{agro}}{PE_{estd}} \geq 60\% \quad (10)$$

Donde,

- $PE_{agro}$  = Producción específica del sistema solar agrovoltaico en MWh/ha/año
- $PE_{estd}$  = Producción específica del sistema solar estándar en MWh/ha/año

## VI. METODOLOGÍA

El proyecto prevé la construcción de una planta agrovoltaica con seguidores solares en las afueras del municipio de Palmira, corregimiento de Mata Palo y La Torre para la producción de arroz de secano.

El objetivo es buscar la viabilidad para la integración de energía renovable y producción agrícola, así como la valorización de las tierras identificadas.

Los puntos centrales del proyecto agrovoltaico son:

- Mitigación de la planta fotovoltaica mediante una franja perimetral.
- Plantación de cultivos de secano entre los seguidores.

El emplazamiento se identifica en las coordenadas geográficas Latitud: 3,580232°; Longitud: -76,424677° con una altitud de 975 m sobre el nivel del mar para una superficie total de aproximadamente 20 Ha.



Fig. 4. Vista en superior de la implantación agrovoltaica.



### A. Diseño técnico de la planta

La planta agrovoltaica tendrá las siguientes características principales:

- Capacidad instalada: 18,446 MWp.
- Máxima potencia de inyección: 19,96 MWac
- Estructura: Tracker 2Px12 (32 Und) – 2P24 (27 Und) – 2P48 (298 Und).
- Altura del seguidor respecto al suelo: 2.9 metros
- Módulos fotovoltaicos: 30.744 módulos con potencia nominal de 600 Wp @STC de la marca Longi Solar (LR5-72HTH-600M G2)
- Nivel de bajo voltaje: 1.500 V en la sección DC y 640 V en la sección AC.
- Tipo de inversores: 20 inversores tipo centralizado con potencia nominal 998 kWac.
- Transformador MT/BT: Cinco (5) transformadores de potencia de 4 MVA 34.5/0,64 kV en aceite.

TABLA 1  
CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA DEL PROYECTO

No. Cab. MV/LV	N. Inversor	N. DC Stringbox	Tot. Strings	Tot. módulos	Potencia DC [kWp]	Tot. Potencia DC [kWp]	Potencia activa máx. [kW]	Potencia transformador MT/BT [kVA]
1	4	14	252	6048	3628,8	3628,8	3992	4000
2	4	14	252	6048	3628,8	3628,8	3992	4000
3	4	14	252	6048	3628,8	3628,8	3992	4000
4	4	12	216	5184	3110,4	3110,4	3992	4000
5	4	2	38	912	547,2	547,2	3992	4000
<b>5</b>	<b>20</b>	<b>71</b>	<b>1281</b>	<b>30744</b>	<b>18446,4</b>	<b>18446,4</b>	<b>19960</b>	<b>20000</b>

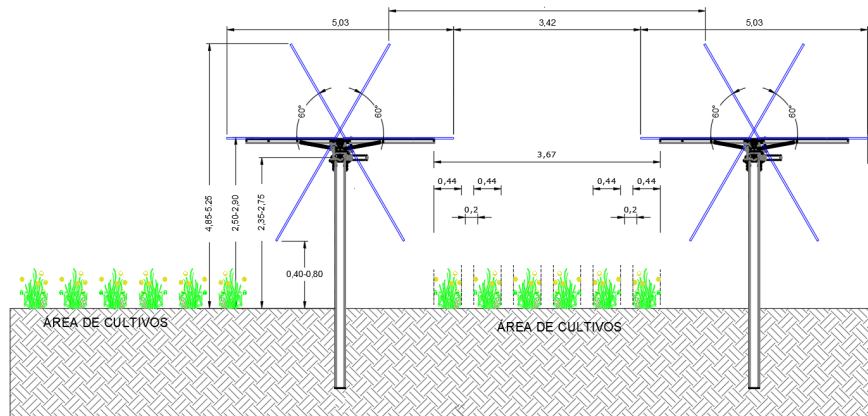


Fig. 5. Plantación entre fila de seguidores (vista frontal)

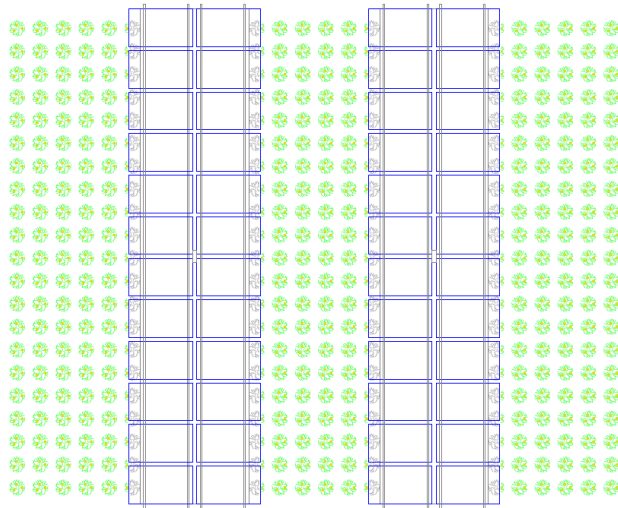


Fig. 6. Plantación entre fila de seguidores (vista superior)

### *B. Identificación y cálculo de áreas*

Para el correcto dimensionamiento del sistema es importante identificar las áreas descritas en el apartado de definición de áreas o superficies agrícolas y, que con la ayuda del software especializado PVcase [3] se modela el terreno con la disposición de paneles solares, además de delimitar las áreas permitidas por el cliente y/o aptas para la instalación agrovoltaica.

En las siguientes imágenes se muestran zonas del parque con la descripción de cada una de las polilíneas que indican la identificación de las áreas objeto de estudio, además de las zonas o superficies implicadas en los cálculos desarrollados a continuación.

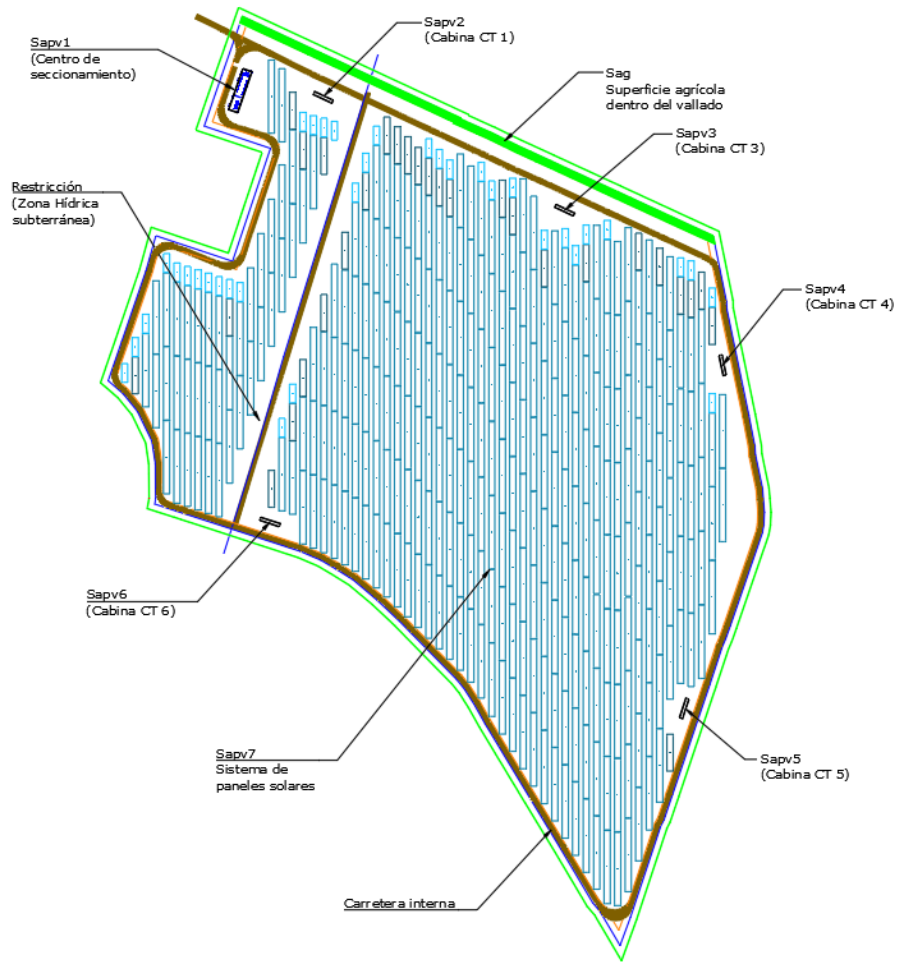


Fig. 7. Identificación de elementos y superficies de la planta agrovoltaica.

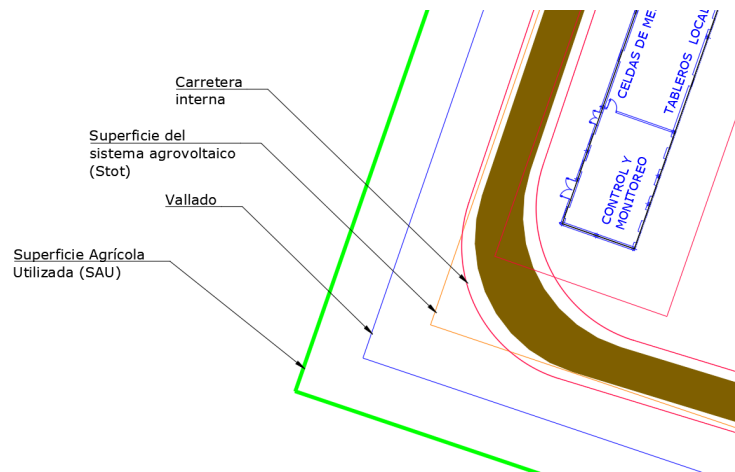


Fig. 8. Detalle con la ubicación de las polilíneas en PVcase (Zonas de estudio)

De acuerdo con la implantación y haciendo uso del software especializado PVcase [3] se pueden calcular las áreas objeto de estudio. De esta manera se calculan la Superficie Agrícola Utilizada ( $SAU$ ) y la Superficie del sistema agrovoltaico ( $S_{tot}$ )

$$SAU = 194.533 \text{ m}^2$$

De acuerdo con la Fig. 7 hay una superficie para propósitos agrícolas dentro del vallado ( $S_{ag}$ ), que de acuerdo con las superficies definidas en el PVcase [3] tiene un área de  $15.256 \text{ m}^2$  y hace parte del  $S_{tot}$ , es decir:

$$S_{tot} = 174.619 \text{ m}^2 + 15.256 \text{ m}^2 = 189.875 \text{ m}^2$$

De la implantación también se pueden calcular fácilmente las superficies que no implican directamente una actividad agrícola ( $S_N$ ), tales como caminos agrícolas, zanjas, canales, estanques, etc., además de la Superficie total con elementos propios del sistema agrovoltaico ( $S_{apv}$ )

$$S_N = 4.414 \text{ m}^2$$

*Superficie del centro de seccionamiento ( $S_{apv1}$ ) =  $740 \text{ m}^2$*

*Superficie de la cabina de transformación ( $S_{apv2,3,4,5,6}$ ) =  $683 \text{ m}^2$*

### *C. Cálculo de la superficie del sistema de paneles solares ( $S_{apv7}$ )*

La  $S_{apv}$  toma la superficie de los equipos eléctricos propios que conforman la instalación del sistema agrovoltaico incluyendo la proyección sobre el suelo de los módulos fotovoltaicos. Dicha proyección se debe tomar con el ángulo del seguidor a  $60^\circ$  respecto a la horizontal, que para el caso de estudio es de  $2.5436 \text{ m}$  ( $L_p$ ).

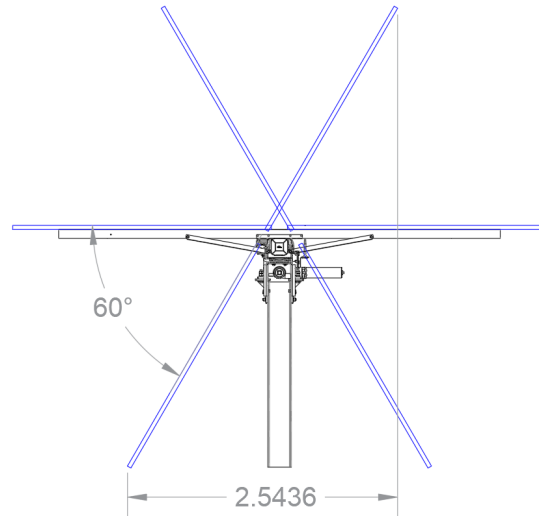


Fig. 9. Proyección del seguidor solar a 60° en vista lateral

Teniendo en cuenta que para el proyecto se consideraron 3 tipos de seguidores con diferentes anchos (2P12, 2P24, 2P48) y tomando la proyección del seguidor a 60° se puede calcular el área proyectada que ocupa cada uno de ellos de la siguiente manera:

$$A_{2PX} = L_p \times W_{2PX} \quad (11)$$

Donde,

$A_{2PX}$  es el área proyectada por el seguidor 2PX

$W_{2PX}$  es el ancho del seguidor 2PX

$L_p$  proyección del seguidor a 60°

De acuerdo con la ficha técnica del seguidor y reemplazando la ecuación (11) para cada tipología, se tiene:

$$\begin{aligned} A_{2P12} &= 2.5436 \times W_{2P12} \\ A_{2P12} &= 2.5436 \text{ m} \times 14.358 \text{ m} \end{aligned}$$

$$A_{2P12} = 36.038 \text{ m}^2$$

$$A_{2P24} = 2.5436 \times W_{2P24}$$

$$A_{2P24} = 2.5436 \text{ m} \times 28.206 \text{ m}$$

$$A_{2P24} = 70.7970 \text{ m}^2$$

$$A_{2P48} = 2.5436 \times W_{2P48}$$

$$A_{2P48} = 2.5436 \text{ m} \times 55.902 \text{ m}$$

$$A_{2P48} = 140.3140 \text{ m}^2$$

Seguidamente se puede calcular  $S_{apv7}$  tomando los resultados de las áreas  $A_{2P12}$ ,  $A_{2P24}$ ,  $A_{2P48}$  y la cantidad total de seguidores de cada topología, en donde se tienen 32 seguidores tipo 2P12, 27 seguidores tipo 2P24 y 298 seguidores tipo 2P48.

$$S_{apv7} = A_{2P12} \times 32 + A_{2P24} \times 27 + A_{2P48} \times 298$$

$$S_{apv7} = 44.878 \text{ m}^2$$

Con esto, se puede reemplazar en la ecuación (2) y (3), obteniendo:

$$S_{apv} = 740 \text{ m}^2 + 683 \text{ m}^2 + 683 \text{ m}^2 + 683 \text{ m}^2 + 683 \text{ m}^2 + 683 \text{ m}^2 + 44.878 \text{ m}^2$$

$$S_{apv} = 49.033 \text{ m}^2$$

Así las cosas, se puede calcular la superficie dedicada a la actividad agrícola ( $S_{agricola}$ ) de acuerdo con la ecuación (6), en el que además se incluye  $S_{ag}$

$$S_{agricola} = S_{tot} - S_{apv} - S_N$$

$$S_{agricola} = 189.975 \text{ m}^2 - 49.033 \text{ m}^2 - 4.414 \text{ m}^2$$

$$S_{agricola} = 135.781 \text{ m}^2$$

Por último, se puede calcular la superficie total de los módulos fotovoltaicos ( $S_{pv}$ ), tomando el ancho y largo del panel de la ficha técnica, y que de acuerdo con la teoría se debe medir en posición horizontal.

$$A_{panel} = 2.278 \text{ m} \times 1.134 \text{ m} = 2.583 \text{ m}^2$$

$$S_{pv} = A_{panel} \times \text{Número de paneles}$$

$$S_{pv} = 2.583 \text{ m}^2 \times 30.744$$

$$S_{pv} = 79.419 \text{ m}^2$$

Con las áreas calculadas se puede hacer el análisis de los criterios de evaluación 1 y 2 de los porcentajes de ocupación de cada una de las superficies estudiadas. Por su parte, el criterio de evaluación 3 depende específicamente de la simulación mediante el modelamiento con el software especializado PVsyst [2], cuya parametrización no es alcance de este documento.

## VII. EVALUACIÓN DE CRITERIOS

### A. Comprobación del criterio de evaluación 1

Con el cálculo de la superficie dedicada a la actividad agrícola ( $S_{agrícola}$ ), la superficie agrícola utilizada ( $SAU$ ) y tomando la ecuación (8), se calcula el porcentaje dedicado a dicha actividad agrícola

$$\frac{135.781 \text{ m}^2}{194.533 \text{ m}^2} = 69.80\%$$

### B. Comprobación del criterio de evaluación 2

Con el valor de la superficie total de los módulos fotovoltaicos ( $S_{pv}$ ), la superficie agrícola utilizada ( $SAU$ ) y tomando la ecuación (9) se calcula el porcentaje cubierto por los módulos fotovoltaicos.

$$\frac{79.419 \text{ m}^2}{194.533 \text{ m}^2} = 40.8\%$$

### C. Comprobación del criterio de evaluación 3

Se empleó el programa PVSyst [2] como herramienta de simulación para calcular la generación anual de energía de la instalación fotovoltaica. Este software es ampliamente reconocido y utilizado a nivel internacional en el ámbito fotovoltaico, siendo considerado una herramienta confiable para este tipo de análisis. Los cálculos se basaron en datos de irradiación obtenidos de las bases de datos de Meteonorm, la cual toma años históricos desde 1991 hasta el año 2010. [5]

Seguidamente, se ingresó la configuración de la planta solar en el software para 3 casos (Agrovoltaico, Estándar 1 y Estándar 2), proporcionando detalles geométricos sobre la disposición de los seguidores, características técnicas de módulos fotovoltaicos, inversores, conductores, transformadores, pérdidas estimadas por suciedad para el primer año de generación, entre otros parámetros.



A continuación, se resumen los datos más relevantes para la simulación de los 3 casos:

TABLA 2  
RESUMEN DE PARAMETROS PRINCIPALES DE LAS CONFIGURACIONES EN PVSYS

Configuración	Estructura	Inclinación	Orientación del eje	Pitch [m]	GCR [%]	Altura media del módulo [m]	Generación de Energía [MWh/año]	Producción Específica anual [kWh/kWp/año]
Agrovoltaico	Seguidor	+/- 60°	N-S	8,1	62,1	2,5	39354	2133
Estándar 1	Seguidor	+/- 60°	N-S	11,5	43,8	1,6	41829	2268
Estándar 2	Mesas	10°	E-O	7,5	67,1	1,2	33526	1817

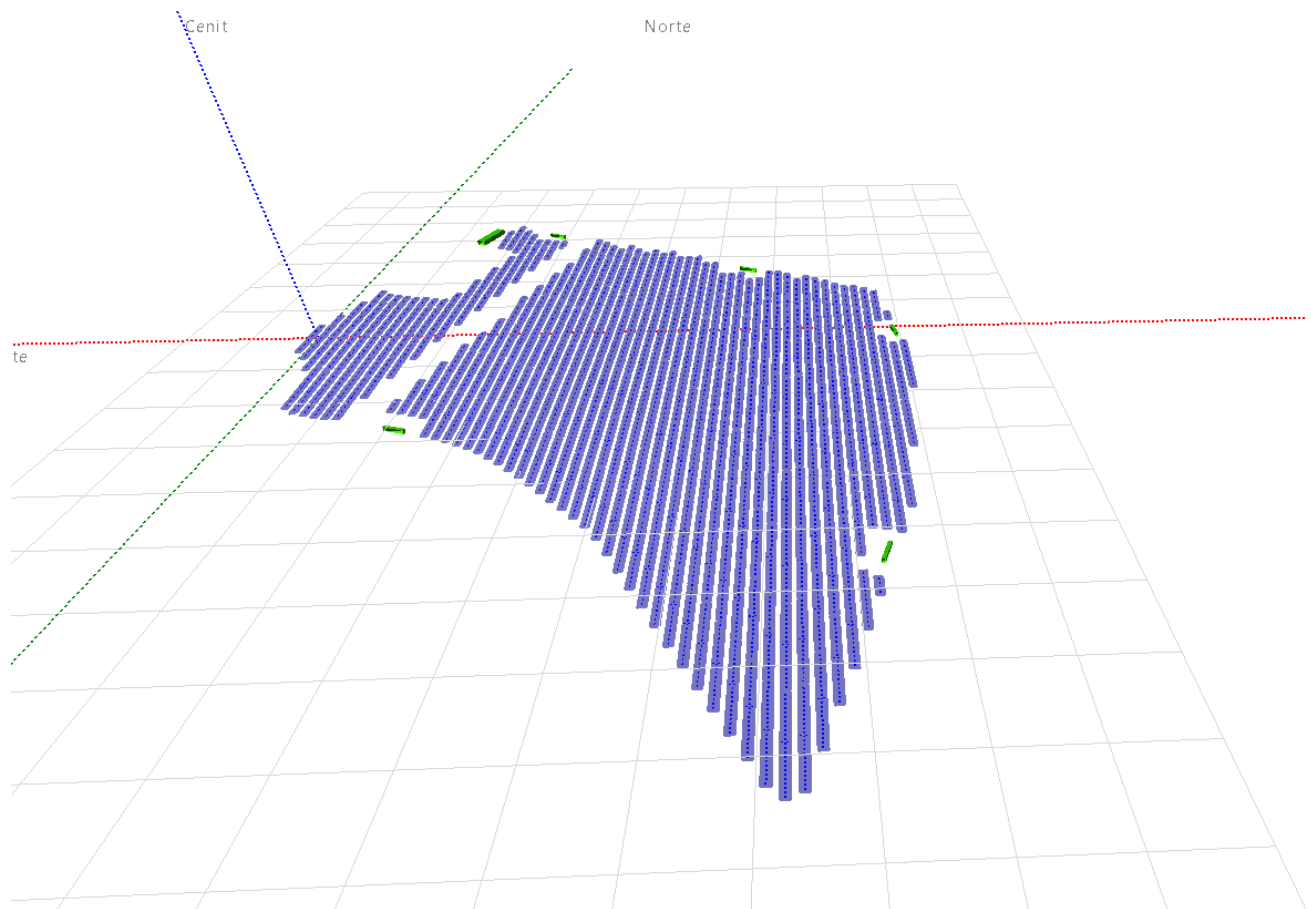


Fig. 10. Modelamiento en PVsyst para determinar sombreados cercanos

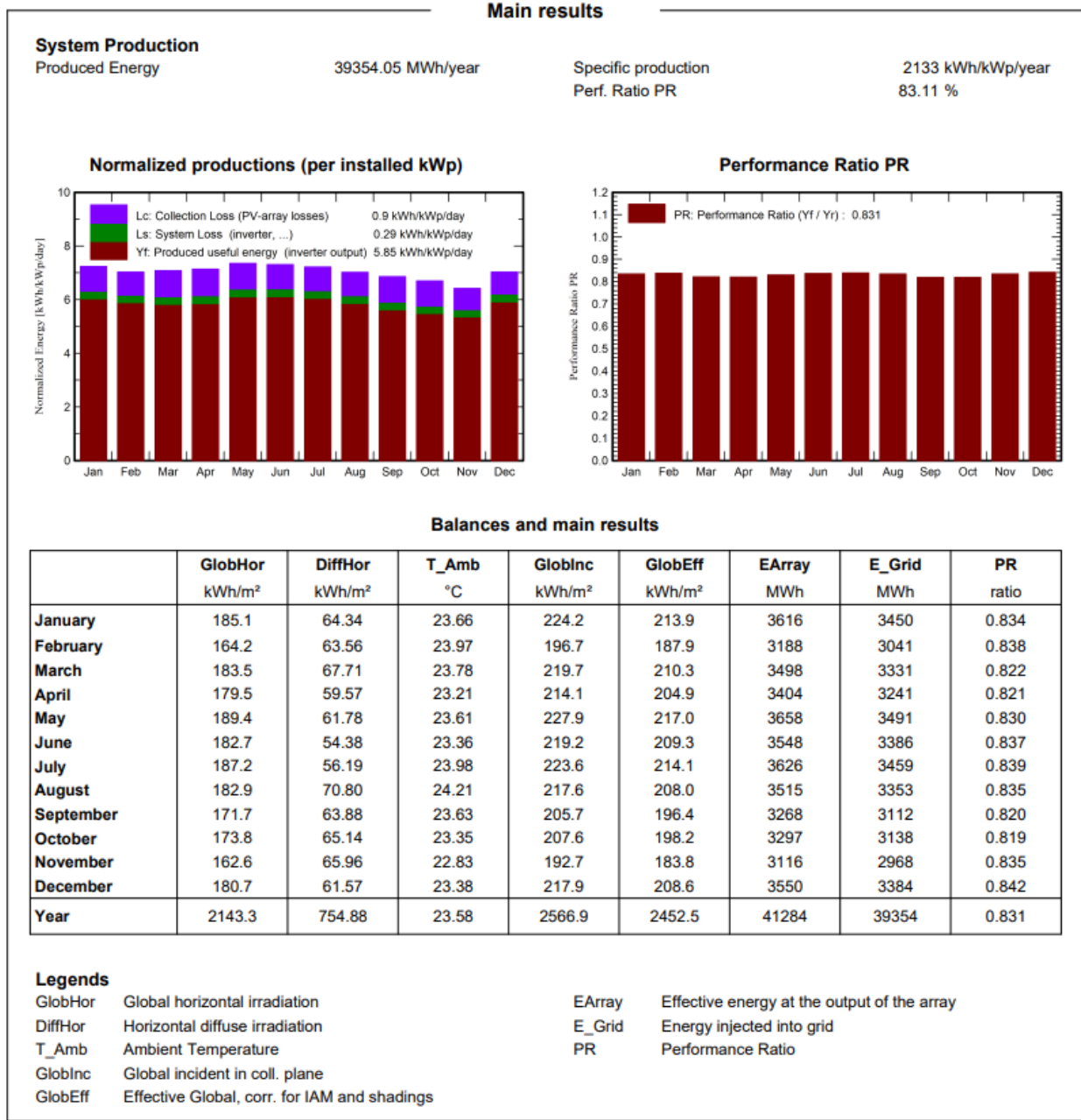


Fig. 11. Resultados de simulación en PVsyst para la configuración agrovoltaica (seguidor solar)

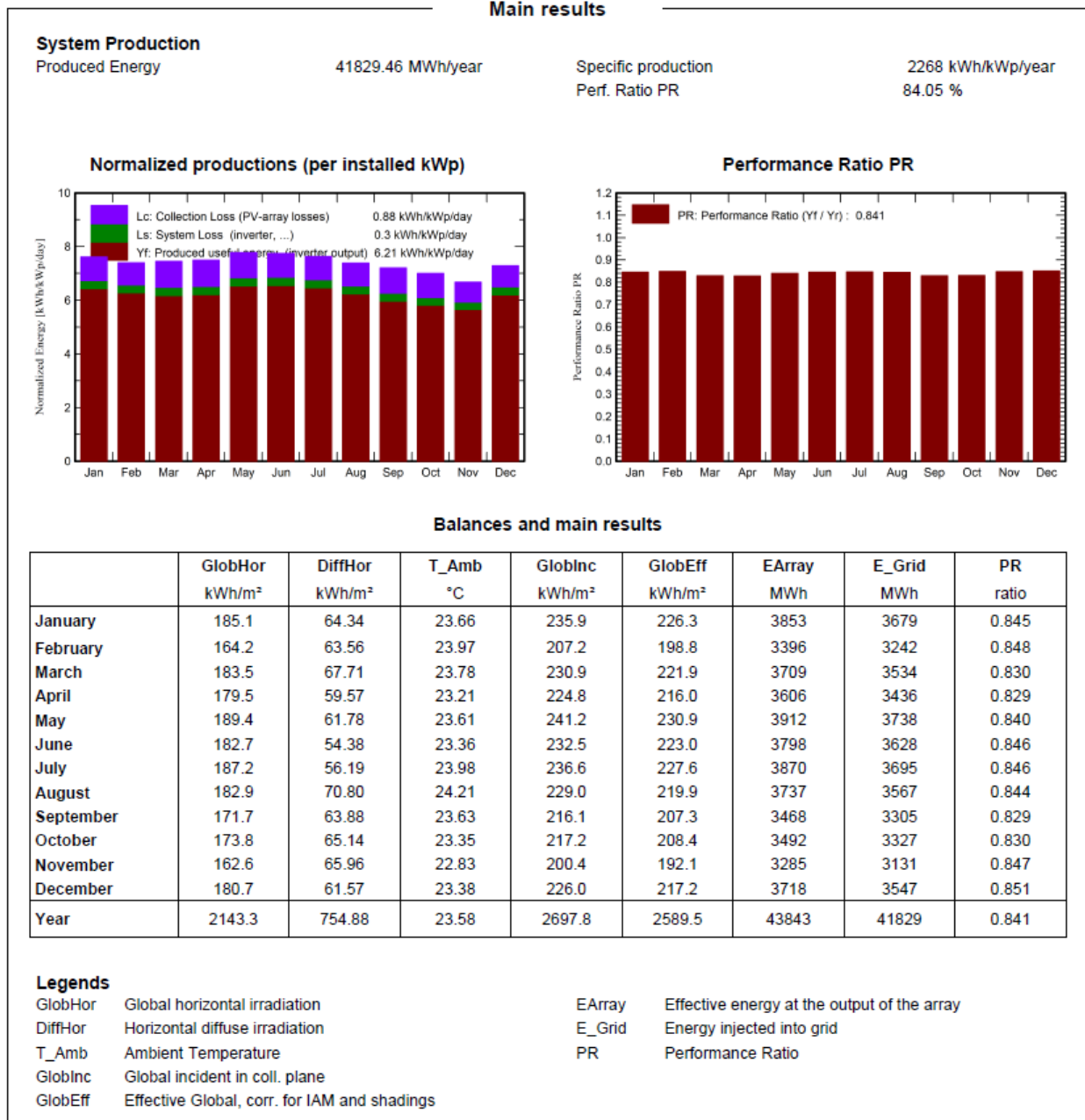


Fig. 12. Resultados de simulación en PVsyst para la configuración estándar 1 (seguidor solar)

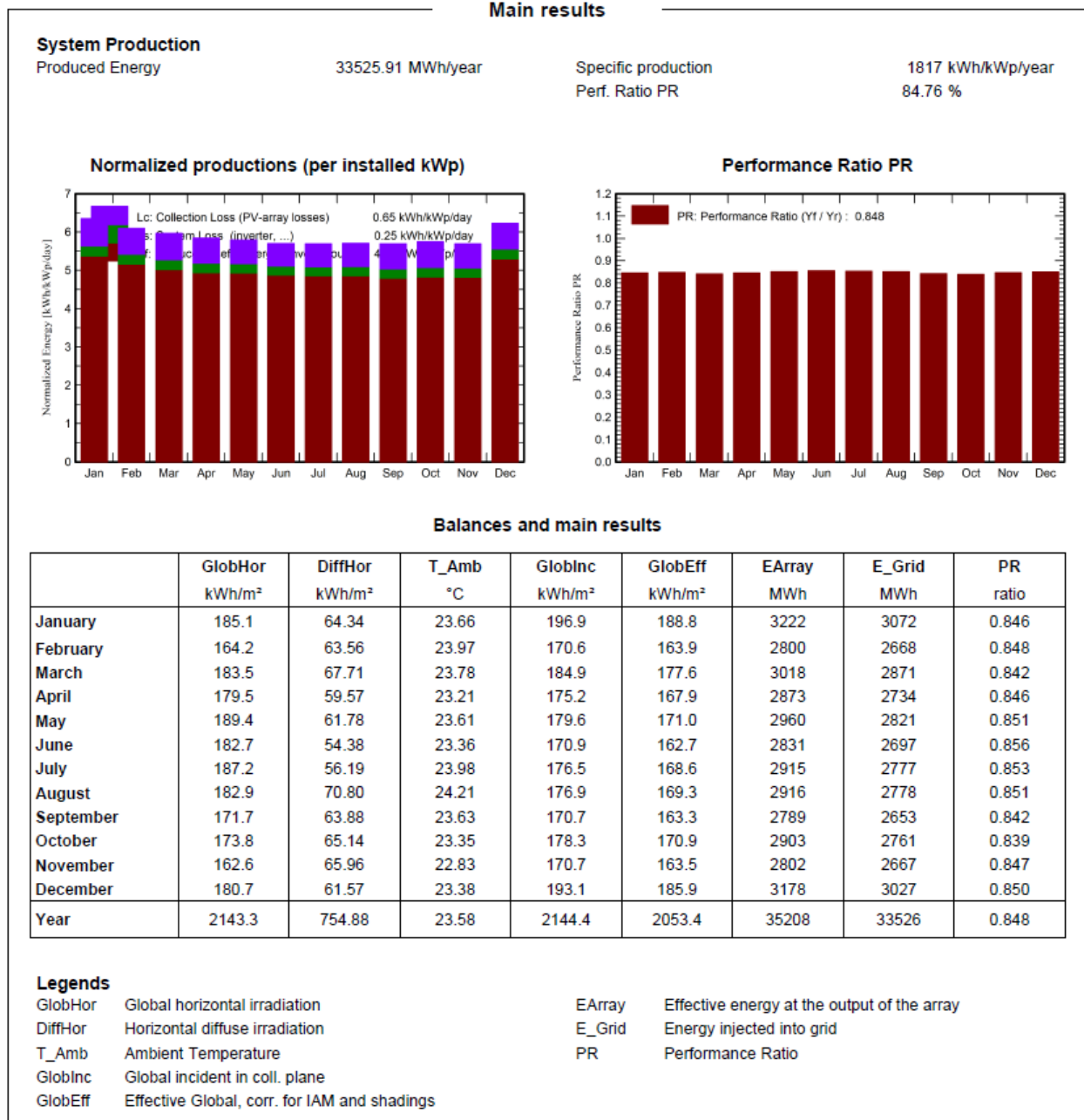


Fig. 13. Resultados de simulación en PVsyst para la configuración estándar 2 (mesas fijas)

Tomando los valores de las producciones específicas de cada uno de los sistemas y remitiéndonos a la ecuación (10), se obtiene el siguiente valor porcentual:

$$\frac{PE_{agro}}{PE_{estd\_1}} \geq 60\% \quad \rightarrow \quad \frac{2133 \text{ kWh/kWp/año}}{2268 \text{ kWh/kWp/año}} \geq 94\%$$

$$\frac{PE_{agro}}{PE_{estd\_2}} \geq 60\% \quad \rightarrow \quad \frac{2133 \text{ kWh/kWp/año}}{1812 \text{ kWh/kWp/año}} \geq 118\%$$

## VIII. RESULTADOS

TABLA 3  
RESULTADOS DE LA IMPLANTACIÓN DEL PROYECTO

Criterio de evaluación	Porcentaje esperado	Resultado	Margen de error	Cumplimiento
1	$\geq 70\%$	69.80%	0,2%	SI
2	$\leq 40\%$	40.8%	-0,8%	SI
3	$\geq 60\%$	94 / 118%	-34 / -58%	SI

De acuerdo con la TABLA 3 se puede inferir que el sistema cumple los 3 criterios de evaluación, pues a pesar de que el porcentaje esperado para los criterios 1 y 2 no llega a los límites estipulado por la norma se puede tomar un margen de error del 1%. Lo anterior se fundamenta en el hecho de que la medida de áreas de los límites de predios y demás superficies también cuentan con un margen de error que podría llegar incluso al ser menos restrictivo permitiendo llegar incluso al 5% al 10%.

Sin embargo, el análisis se puede llevar a casos en los que los resultados no estén dentro de dicho margen de error, lo que llevaría a considerar incrementar algunas de las áreas para el cumplimiento de la norma.

Así, mediante las ecuaciones (12) y (13) se puede determinar la cantidad de terreno necesaria faltante para cumplimiento de los criterios de evaluación 1 y 2.

$$A_{c1} = \frac{70\% \cdot (SAU - S_{agricola})}{1 - 70\%} \quad (12)$$

$$A_{c2} = \frac{S_{pv}}{0.395} - SAU \quad (13)$$

Donde;

$A_{c1}$  es la cantidad de terreno faltante para cumplimiento del criterio de evaluación 1

$A_{c2}$  es la cantidad de terreno faltante para cumplimiento del criterio de evaluación 2

## IX. CONCLUSIONES

Basándonos en los resultados obtenidos, la propuesta de incentivar proyectos en zonas extensivas del Valle del Cauca, cumple con los requisitos establecidos en las pautas para sistemas agrovoltaicos, los cuales son necesarios para clasificar un sistema fotovoltaico instalado en una zona agrícola como "agrovoltaico", pues permite que la actividad agrícola se desarrolle sin problemas en los terrenos objeto de estudio y produce valores de energía eléctrica más de lo estipulado, llegando a estar por encima del 60%.

Los valores porcentuales de los criterios 1, 2 y 3 pueden ser adaptados a la topología Colombiana, pues los resultados obtenidos muestran que dichos criterios no dependen necesariamente de la ubicación del proyecto sino de las áreas objeto de estudio. Sin embargo, en la medida que se incremente el número de proyectos de este tipo, se pueden ir adaptando valores que vayan en concordancia con las practicas agrarias desempeñadas a nivel nacional, para lo cual, se deberán realizar análisis que identifiquen las necesidades particulares de cada sistema que permita encontrar criterios propios para sistemas agrovoltaicos, no solo para el Valle del Cauca, sino a nivel nacional.

Este tipo de instalaciones son frecuentes en Europa y prácticamente obligatorias en Italia para la construcción de centrales solares en suelos agrícolas, buscando fomentar la continuidad de la actividad agrícola sostenible. Colombia por su parte, no tiene normas o leyes que relacionen las actividades agrarias con parque solares, pero que pueden ser incluidas en algunos códigos, como la ley 1715 de 2014, que promueve mediante incentivos tributarios los proyectos basados en fuentes no convencionales de energía.

Respecto a los valores obtenidos del criterio 3, para los 3 tipos de configuración se utilizaron paneles bifaciales para mantener la proporción de bifacialidad en cada uno de ellos, en donde, los sistemas con seguimiento obtuvieron mayores producciones de energía al mantenerse casi perpendicularmente a los rayos solares, lo que maximiza la cantidad de radiación solar incidente como era de esperarse. [13]

Por último, al comparar la configuración agrovoltaica con la configuración estándar 1 observamos que esta última tiene una producción de energía un poco mayor dado que se trabaja con un GCR del 43%, porcentaje que indica una separación mayor entre fila de seguidores, es decir, no tenemos restricciones de superficies que limiten la instalación de seguidores. Por el contrario, al comparar la configuración agrovoltaica el GCR sube casi al 68%, evidenciando una leve caída en su producción de energía. Aun así, se cumple con el criterio 3 llegando a tener una relación en porcentaje del 94%.



## X. RECOMENDACIONES

Es importante mencionar la utilización de softwares especializados para la simulación de parques solares, ya que permitirán modelar con precisión la interacción entre los paneles y los cultivos, considerando factores como sombreado, inclinación y orientación. Además, se deberán utilizar datos climáticos específicos de la ubicación del sistema agrovoltaico. La radiación solar, la temperatura y otros datos climáticos son críticos para obtener simulaciones precisas.

En referencia a las normas utilizadas y como se mencionó en el apartado de las definiciones, el anterior análisis se hizo tomando como referencia una norma de carácter experimental, por lo que es muy probable que se vaya actualizando con el paso del tiempo en función de los avances y/o mejoras que se vayan obteniendo. Por ende, es necesario realizar revisiones periódicas para estar a la vanguardia con los cambios y actualizaciones.

Por último, el proyecto de Palmira aquí mencionado presenta retos para la producción agrícola de arroz de secano, por lo que las condiciones del proyecto se prestan solo para este tipo de siembras. En otros casos, hay que elegir los cultivos adecuados y un diseño del sistema apropiado para minimizar los riesgos y optimizar las sinergias.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. F. I. S. Anie Rinnovabili, “Sistemi Agro-Fotovoltaici,” 2022.
- [2] PVsyst SA, “PVsyst 7.4.0 - Photovoltaic Software.” PVsyst SA, Switzerland, Nov. 20, 2023.
- [3] PVcase, “PVcase Ground Mount.” Kaunas, 2022.
- [4] Daniela Monroy Ramírez / Reportera de El País, “Alimentos que más se producen en el Valle del Cauca ,” Periodico El País.
- [5] Meteotest AG, “Meteonorm 8.2.0.” Berna, 2022.
- [6] E. Potenza, M. Croci, M. Colauzzi, and S. Amaducci, “Agrivoltaic System and Modelling Simulation: A Case Study of Soybean (*Glycine max* L.) in Italy,” *Horticulturae*, vol. 8, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/horticulturae8121160.
- [7] A. Martínez, “Transición Energética y Retos del sector energético en Colombia,” 2021.
- [8] Autorità di gestione Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali, “Verso la strategia nazionale per un sistema agricolo, alimentare forestale sostenibile e inclusivo,” 2021.
- [9] E. P. Héctor Ardisana Bárbara Millet Gaínza Antonio Torres García Osvaldo Fosado Téllez EC, “Agricultura en sudamérica: la huella ecológica y el futuro de la producción agrícola,” *Revista Chakinan*, 2018.
- [10] CT 82-Sistemi di conversione fotovoltaica dell’energia solare, “CEI PAS 82-93 - Impianti Agrivoltaici,” Comitato Elettrotecnico Italiano. Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://mycatalogo.ceinorme.it/cei/item/0000019155?sso=y>
- [11] A. Mermoud and B. Wittmer, “Yield simulations for horizontal axis trackers with bifacial pv modules in pvsyst,” in *European Photovoltaic Solar Energy Conference-Brussels*, 2018.
- [12] Ministero della transizione ecologica - Dipartimento per l’energia, “Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici,” 2022.
- [13] J. Arturo Pelayo López, A. Luna Soto, F. Bernabe Ramos, and B. Guzmán Flores, “Comparativa entre la eficiencia de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo,” 2017.