

# Evaluación Económico-Energética de la Tecnología Agrivoltaica para los Cultivos de Cacao

## Economic-Energetic Evaluation of Agrivoltaic Technology for Cocoa Crops

Nicolas Guerrero Naranjo <sup>1</sup>, Guillermo Jiménez Estévez <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de Los Andes, Colombia. Orcid: xx. correo electrónico: nd.guerreron@uniandes.edu.co

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de Los Andes, Colombia. Orcid: xx. correo electrónico: ga.jimenezc@uniandes.edu.co

Recibido: 23/06/2023. Aceptado: 22/08/2023. Versión final: 27/09/2023

### Resumen

El cambio climático y el uso de energías no renovables representan una amenaza mundial. Para mitigar este problema, la implantación de energías renovables, como la solar, está ganando popularidad. Sin embargo, para esta se necesitan grandes extensiones de terreno. En consecuencia, la tecnología agrivoltaica (APV) se presenta como una alternativa que combina la agricultura y la energía solar de forma beneficiosa y sinérgica. En este documento se evaluó la factibilidad de implementar cultivos de cacao en Cabuyaro, Meta, utilizando APV. Para ello, se diseñó un sistema conceptual teniendo en cuenta los requerimientos del cultivo y las características técnicas del municipio. Se simuló dos escenarios utilizando HOMER Pro: uno con APV operando como microrred aislada y otro conectado a la red. Se realizó un análisis económico de ambos casos, demostrando la viabilidad del sistema. Finalmente, el estudio concluye con una perspectiva sobre la utilidad de este concepto en el país.

**Palabras clave:** agricultura; cacao; energía solar; microrred; paneles solares; sistema de riego; tecnología agrivoltaica.

### Abstract

Climate change and the use of non-renewable energy represent a global threat. To mitigate this problem, the implementation of renewable energies, such as solar energy, is gaining popularity. However, this requires large tracts of land. Consequently, agrivoltaic technology (APV) is presented as an alternative that combines agriculture and solar energy in a beneficial and synergistic way. This paper evaluated the feasibility of implementing cocoa crops in Cabuyaro, Meta, using APV. For this purpose, a conceptual system was designed taking into account the crop requirements and the technical characteristics of the municipality. Two scenarios were simulated using HOMER Pro: one with APV operating as an isolated microgrid and the other connected to the grid. An economic analysis of both cases was performed, demonstrating the viability of the system. Finally, the study concludes with a perspective on the usefulness of this concept in the country.

**Keywords:** agriculture; cocoa; solar energy; microgrid; solar panels; irrigation system; agrivoltaic technology.

Cómo citar: N. Guerrero-Naranjo, G Jiménez-Estévez, "Evaluación Económico-Energética de la Tecnología Agrivoltaica para los Cultivos de Cacao en Cabuyaro, Meta," in *XI Simposio Internacional de Calidad de la Energía Eléctrica*, Valledupar: Universidad Nacional de Colombia, Nov. 2023. doi: <https://doi.org/10.15446/sicel.v11i.109689>.

## 1. Introducción

Actualmente, la energía se encuentra en el centro de atención. Fenómenos como el calentamiento global y el cambio climático, han motivado la búsqueda de fuentes de generación más ecológicas, con la finalidad de satisfacer la creciente demanda. De hecho, recientemente estudios estiman que la población mundial alcanzará los 10.000 millones de habitantes en 2050 [1]. Una cifra que podría generar una crisis energética si no se toman medidas al respecto. Con esto en mente, diversos países industrializados entre los que destacan Estados Unidos, China, Japón, Alemania e Italia han recurrido a la producción masiva de energía solar. Esto, gracias a que representan sistemas sustentables, con independencia energética y de fácil mantenimiento [2]. Sin embargo, la producción de energía solar a grandes escalas requiere de enormes superficies de tierra. Es decir, debemos debatir entre ceder vastos terrenos para la producción de energía u otros usos, entre lo que destaca la agricultura.

Inicialmente, llegar a un equilibrio no es fácil porque tanto la seguridad alimentaria como la energía representan factores de gran importancia para la población mundial. En donde, las prácticas no sostenibles de la producción de alimentos y otras materias primas de origen agrícola, representan una de las amenazas globales más preocupantes para el medio ambiente y la humanidad [3]. Si bien la adopción de prácticas agrícolas intensivas como la flori cultura en invernaderos, el cultivo de frutas exóticas con técnicas avanzadas, la producción intensiva de hortalizas mediante invernaderos y riego eficiente, mejoras en la calidad y rendimiento del café, la controversial palma de aceite en plantaciones intensivas, y la implementación de estructuras de agricultura protegida [4], están directamente relacionadas con la problemática, la modernización de la agricultura está contribuyendo a aumentar la productividad de los cultivos objetivos y la mano de obra, a costa de reducir la eficiencia energética y aumentar la dependencia de la energía fósil, al tiempo que contribuye a otros impactos ambientales [5]. En otras palabras, la producción de energía solar y las prácticas poco sostenibles enfocadas en la agricultura, amenazan significativamente el destino humano gracias a sus repercusiones sociales, tanto medioambientales como económicas, y el elevado costo de aplicar medidas de adaptación y mitigación [6].

No obstante, tenemos a nuestra disposición una tecnología innovadora que nos permite aprovechar tanto el terreno, como la energía sola, de forma eficiente y sostenible. Esta se conoce como la tecnología agrivoltaica o agrofotovoltaica (*AgroPV*). La tecnología *AgroPV* comprende el método en donde es posible erigir múltiples paneles solares sobre hectáreas de cultivos sin

dañar la capacidad de producción de alimentos. En este caso, empleando la sombra de los paneles solares para hacer crecer diversos tipos de cultivos, se obtienen diferentes beneficios en materia de eficiencia energética, rendimientos agrícolas y ahorro de agua. Hoy por hoy, se puede identificar una lista preliminar de cultivos que podrían beneficiarse de la tecnología *AgroPV* gracias a una investigación en Alemania, así como a un estudio en Vietnam sobre el potencial del uso común de la tierra [7]. Entre estos destacan el arroz, fresas, zanahorias, legumbres, café, cacao, etc.

Colombia tiene un potencial solar de 6 kW/h ( $m^2/da$ ), superior al promedio mundial de 3,7 kW/h ( $m^2/da$ ), en donde solo el 0,19% de la energía proviene de fuentes solares [8]. Así mismo en 2021, el valor del sector agrícola superó los 87,4 billones de pesos colombianos, lo que representó un incremento de alrededor del 18% en comparación con lo reportado el año anterior. De acuerdo con el análisis de la Dirección de Estudios Económicos del Plan Nacional de Desarrollo (DNP), las principales exportaciones se dieron en café, cacao, especias y sus preparados en un 36% de las ventas al exterior. Es importante mencionar que dicho sector es la sexta rama económica que mayor valor aporta al PIB [9], que le significaron ingresos a los exportadores por US\$2,108 millones [9]. Así como, que en la evaluación de seguridad alimentaria de la WFP en febrero de 2023, se determinó que 2,1 millones de colombianos se encuentran en situación de inseguridad alimentaria severa. Es decir, que no tienen opciones de medios de vida y enfrentan brechas extremas de consumo de alimentos [10]. Por tanto, la implementación de la tecnología *AgroPV* para explotar el potencial agrícola que presenta Colombia, representa una alternativa viable de estudio.

Por otro lado, es importante ejemplificar que el cultivo de cacao en Colombia es vital por varias razones, estas siendo: contribución económica, ya que Colombia es un destacado productor de cacao, lo que impulsa las exportaciones y los ingresos del país. Empleo rural, gracias a que la producción y procesamiento del cacao generan empleo en áreas rurales, mejorando las condiciones económicas. Conservación de biodiversidad, puesto que el cultivo en sistemas agroforestales preserva la biodiversidad al integrarse con el entorno natural. Herencia cultural, teniendo en mente que el cacao tiene una larga historia en la cultura colombiana, siendo parte de tradiciones y la identidad regional. Productos de calidad, ya que el país produce cacao fino y de aroma, permitiendo la elaboración de chocolates de alta calidad y productos derivados[10].

Es importante mencionar que la tecnificación de la agricultura industrial, es un hecho. En el país, el cacao es cultivado principalmente sin tecnificación y por pequeños agricultores en los departamentos del Santander, Antioquia, Meta, Huila, Tolima, y Nariño, para luego ser exportado y ser consumo nacional sobre todo para la producción de chocolate y otros subproductos. Sin embargo, el aumento de la demanda mundial de cacao ha provocado cambios en los sistemas de producción de este cultivo. Por ejemplo, el manejo tradicional a pleno sol ha sido sustituido gradualmente en SAF con sombra [10]. Igualmente, la mano de obra y los insumos producidos localmente están siendo sustituidos en las explotaciones por un gran número de insumos externos como fertilizantes sintéticos y maquinaria automatizada de riego [11]. Entre otras razones, para satisfacer la demanda, hacer parte del mercado competitivo y gracias a los mayores rendimientos a largo plazo [12].

Con esto en cuenta, se realizó una evaluación económico-energética de la tecnología *AgroPV* para los cultivos de cacao, en el municipio de Cabuyaro, Meta. De esta forma, se pretende explorar el potencial de generación de energía *AgroPV* de las plantas fotovoltaicas en Colombia, identificar criterios de selección para filtrar las posibles áreas o zonas con posible potencial de desarrollo *AgroPV* en el territorio Colombiano, analizar el papel de los cultivos de cacao dentro de la tecnología *AgroPV*, que permitan establecer beneficios a los productores, y promover el liderazgo del país en la adopción de soluciones ecológicas a la crisis energética y la carbono neutralidad en el 2050, mejorando la calidad de vida de los habitantes de la zona.

Para esto, este documento se encuentra dividido de la siguiente forma. Inicialmente, en el capítulo 2 se presenta el marco de referencia, es decir, una revisión del estado del arte que comprende la implementación de proyectos *AgroPV* a nivel mundial, Latinoamérica y los avances teóricos a nivel nacional. Seguido de esto, en el capítulo 3, se presenta la propuesta metodológica de desarrollo. Este comprende la caracterización del municipio y la caracterización técnica del sistema *AgroPV*. Consecuentemente, en el capítulo 4 se presentan los resultados. Estos comprenden, el diseño del sistema *AgroPV* implementado en Revit, las simulaciones realizadas en la plataforma HOMER pro, correspondientes a los dos escenarios planteados, así como el análisis económico del mismo. Finalmente, en él se presentan las conclusiones en la sección 5.

## 2. Marco Referencia

### 2.1. Tecnología Agrivoltaica

En todo el mundo, los sistemas *AgroPV* son cada vez más populares, porque no sólo sustituyen a los paneles que dan sombra a los cultivos, sino que también generan electricidad que, si no se comercializa, se emplea para hacer funcionar las granjas por sí solas. Dentro de esta convivencia entre paneles y cultivos, se presenta la siguiente "simbiosis":

- Los cultivos, protegidos por los paneles solares de los rayos del sol, se convierten en pequeños enfriadores evaporativos en el paisaje. Disminuyendo tanto la temperatura del ambiente como el requerimiento de irrigación [13].
- Los módulos solares pueden perder eficiencia mientras funcionan a altos niveles de temperatura. Por tanto, los paneles funcionan a un nivel superior, gracias a este microclima más fresco que ofrecen las plantas. Los paneles, a su vez, protegen a las plantas de las quemaduras solares y la deshidratación [13].

Con esto en consideración, los principales campos *AgroPV* se encuentran en China, Estados Unidos, Japón, India y Alemania. Por un lado, China produce actualmente 205,2 GW de energía fotovoltaica en granjas solares, inicialmente para combatir la desertificación. No obstante, actualmente se usa para producir energía renovable sostenible y aumentar el rendimiento de los cultivos. En este caso, la productividad ha aumentado un 55%, así como, la reducción de costos en un 12% después de los 10 años de haberse implementado la tecnología, mediante la aplicación de cultivos como la baya de goji, el brócoli y la chalota [14].

De la misma manera, Japón produce 40 GW a través de varios huertos y algunas centrales solares. Recientemente, se empezó a construir una central *AgroPV* de 480 MW que se extiende hasta 800 hectáreas de terreno [14]. De hecho en un estudio de caso, descubrieron que la zona sombreada que corresponde a la instalación de módulos fotovoltaicos (aproximadamente el 27%-39%), incrementó la producción de arroz al 20%, registrada en el campo prior APV. Es decir, estas células podrían generar unos 285 millones de MWh al año [15].

En un mismo panorama, Estados Unidos produce 80 GW de energía mediante el uso de energía fotovoltaica. Sin embargo, debido a su falta de restricción adecuada sobre lo que representa esta tecnología, se puede ver que EE.UU. considera granjas solares con fines comerciales

las colmenas, las explotaciones ganaderas alimentadas por paneles solares, y algunos sistemas agro fotovoltaicos convencionales que utilizan cultivos como alfalfa, lechuga, espinacas, judías, col rizada, etc. [16]. Por otro lado, el Ministerio de Energías Nuevas y Renovables (MNRE) de India, firmó un acuerdo con los Gobiernos de Malasia y los Países Bajos para fomentar y promover el empleo de la tecnología, mediante la sensibilización y la investigación en colaboración con las partes implicadas [17].

A nivel Latinoamérica, Chile destaca por su rápido crecimiento del sector energético, con ambiciosos objetivos de expansión de las energías renovables no convencionales. Estos tienen un proyecto compuesto de 3 instalaciones fotovoltaicas en cultivos de hortalizas. La energía producida es empleada para el autoconsumo de los beneficiarios y para la inyección de excedentes a las redes eléctricas de la región. Con respecto a la sombra recibida por las hortalizas, se percibió un aumento en la producción del cultivo en un 22%. Por parte de la humedad, se evidenció un incremento entre el 10% y 20%, lo cual conlleva a una disminución en la necesidad de irrigación [18].

En Colombia no hay implementaciones de campos *AgroPV* físicos. Sin embargo, Cusva, presenta un análisis para determinar la viabilidad y potencialidad de sistemas *AgroPV* en zonas agricultoras de Colombia. En este, expuso el análisis para determinar la viabilidad y potencial de los sistemas *AgroPV* en Calamar, un municipio agrícola localizado en el norte colombiano, para el cultivo de Yuca. [19]. Por otro lado, Céspedes, realizó un análisis computacional del comportamiento de los sistemas *AgroPV* en el país con la finalidad de determinar su eficiencia, obteniendo resultados positivos [20]. Finalmente, Rodríguez, presentó una evaluación de la rentabilidad económica y la viabilidad técnica de la tecnología *AgroPV* en el cultivo de arroz en Colombia, recalando el potencial de los cultivos [21].

Considerando lo expuesto previamente, en este trabajo se presenta la propuesta de un esquema *AgroPV* para el cultivo del cacao, en donde se contempla la generación de sombra proporcionada por paneles solares. No obstante, se hace hincapié en el reconocimiento y el valor de la sombra natural bajo este contexto y que representa un tópico de interés posterior evaluación y estudio bajo la premisa de que no debiese existir competencia entre las estrategias de sombreado.

### 3. Propuesta Metodológica

La metodología a implementar consta de las siguientes etapas que se mencionan a continuación en la figura 1.

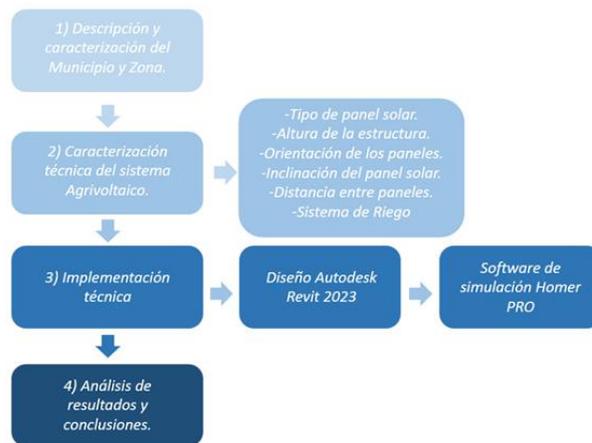


Figura 1. Propuesta metodológica.

Primero, se realiza la caracterización del municipio. En esta, se profundiza sobre la ubicación, características, indicadores e información que permita parametrizar el sistema. Segundo, procede la caracterización del sistema *AgroPV*. En este caso, se definen los 6 parámetros más importantes del sistema siendo estos: el tipo de panel solar, la altura de la estructura, la orientación de los paneles, la inclinación de los paneles, la distancia entre los mismos y el riego y caracterización del consumo. Tercero, procede la implementación técnica. Esta comprende los resultados del diseño en Revit, y las simulaciones de los dos escenarios en Homer PRO. Finalmente, se presenta el análisis económico de los casos, así como la discusión y conclusiones del proyecto.

A continuación se procede a profundizar cada sección de la metodología propuesta.

#### 3.1. Caracterización del Municipio

Localizado en el departamento del Meta, el municipio de Cabuyaro hace parte de la Subregión del Río Meta, localizado a 151 metros de altitud. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 22°C a 34°C, con precipitaciones anuales de 1.250 mm. La superficie del terreno son 83.200 hectáreas, de las cuales se dispone de aproximadamente 41.103 hectáreas para la agricultura. En la figura 2 se observa la ubicación geográfica del municipio.

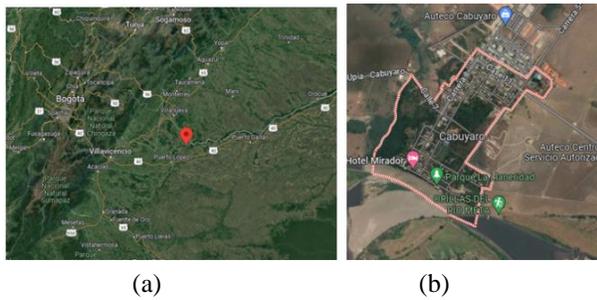


Figura 2. Ubicación Geográfica del Municipio Cabuyaro (a) territorial (b) municipal.

Por otro lado, de acuerdo a los censos del DANE el municipio cuenta con más de 6.630 habitantes, estando la cabecera municipal interconectada a la red procedente de Puerto López. Aquí, la subestación Campo Bonito EMSA cubre el 100% de la zona rural. Adicionalmente, los indicadores de calidad del servicio para el año 2022 como el SAIDI y el SAIFI revelan que el municipio se encuentra 1,04 horas por encima de municipios vecinos [22]. Estas siendo 29,5 horas y 36,2 interrupciones anuales. Esto quiere decir que el tiempo total promedio de interrupción por usuario en Cabuyaro, es superior a las regiones vecinas, haciendo referencia a un déficit en la prestación de servicio, con opción de mejora.

Asimismo, comparando estos valores con los indicadores promedio en Colombia durante los últimos y próximos 2 años, disponibles en los informes de Superservicios [23], nos damos cuenta que se encuentran por encima de la media. Estas siendo 27,2 horas y 35,1 interrupciones anuales.

### 3.1.1 Estimación del Consumo de Energía

Por otro lado, tomando en cuenta la información relacionada con el componente tarifario, para la prestación del servicio eléctrico en Cabuyaro para los habitantes residenciales rurales, sin especificación de estrato ni actividad, en el año 2022, de acuerdo al Sistema único de Información (SUI)[24] y teniendo como referencia [20], se perfiló la energía promedio requerida por el agricultor diaria y mensualmente. Este se realizó en el software System Advisor Model (SAM), y se visualiza en la tabla 1.

Tabla 1. Energía promedio requerida por el agricultor diaria y mensualmente.

Mes [°]	[kWh/día]	[kWh/mes]
Enero	5,21	161,62
Febrero	5,45	152,64
Marzo	5,28	163,53
Abril	5,56	166,79
Mayo	5,07	157,16
Junio	4,99	149,70
Julio	5,03	150,95
Agosto	5,04	151,12
Septiembre	5,22	156,73
Octubre	5,41	162,28
Noviembre	5,35	160,37
Diciembre	5,54	166,31

### 3.1.2 Descripción del Recurso Solar

Consecuentemente, procedemos a obtener la irradiación solar media horizontal (GHI), a lo largo de los meses del año en el terreno. Esta se obtiene gracias a la plataforma de la Comisión Europea Photovoltaic Geographical Information System (PVG). A continuación en la figura 3 se presenta la irradiación solar mensual para el año 2021.

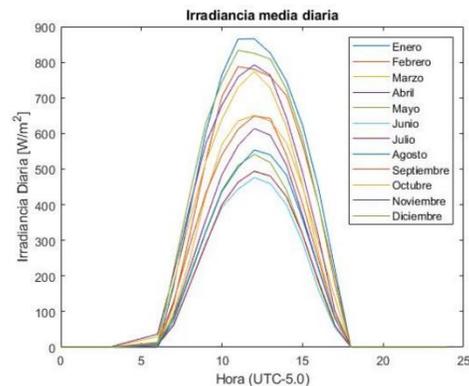


Figura 3. Irradiancia media diaria, en el terreno.

La zona posee una radiación global horizontal (GHI) promedio anual de  $178,07 [W/m^2]$ , una temperatura ambiente promedio anual de  $24,4 [°C]$ , presencia de nubes promedio anual del  $11,7 \%$  y una velocidad del viento promedio anual de  $2,2 [m/s]$ .

### 3.2. Caracterización Técnica

Teniendo en mente la información presentada en la anterior sección, se procederá a diseñar el sistema *AgroPV*. Para esto, inicialmente tenemos que tener en mente que los modelos fotovoltaicos tradicionales deben diseñarse encontrando la ubicación de producción óptima para ambos sistemas. Tanto económico como agro, y los 6 parámetros identificados con anterioridad.

### 3.2.1 Riego y Caracterización del Consumo

Inicialmente, es necesario definir un sistema de riego, para tener el perfil de carga diario del agricultor. En tal caso, de acuerdo a una evaluación de sistemas de riego localizado en cultivos de cacao, para diferentes departamentos de Colombia [25], se encontró que entre el riego localizado por goteo, microaspersión y micro manguera con tres repeticiones, el riego por goteo resulta ser el más efectivo, gracias a su excelente uniformidad, la posición en la que este sistema representa una buena alternativa para solucionar problemas de déficit hídrico en cultivos de cacao y a más bajo costo.

El riego por goteo es un tipo de riego localizado que consiste en suministrar el agua en forma de gotas que acceden a la zona radicular de cada planta, a través de unos pequeños goteros. Este contiene cinco componentes principales, los cuales son: Sistema de entrega o de distribución, filtros, reguladores de presión, válvulas y medidores, finalmente inyectoros químicos.

Con esto en mente, el requerimiento de irrigación para las plantas de cacao son de 36 [l] diarios [25], distribuidos durante el transcurso del día. De igual forma, dentro del estudio se tiene en mente variables como la pluviosidad y las tasas de evapotranspiración de las plantas. Asimismo, gracias a la ubicación de la zona y por la temporada de lluvias, durante los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto la bomba centrífuga va estar apagada. Teniendo esto en mente, vamos a calcular la potencia del mismo. Para esto, inicialmente determinamos el caudal. En este caso, tenemos que:

$$\text{Irrigación diaria} = \text{No. Arboles} \cdot \text{Litros}$$

$$\text{Irrigación diaria} = 60 \cdot 36 = 2160 \text{ [l/da]}$$

$$\text{Irrigación Horaria} = \frac{2160}{3} = 720 \text{ [l/h]}$$

$$\text{Caudal} = \frac{720}{3600} = 0,2 \text{ [l/s]}$$

En este caso, tenemos que el caudal para el cultivo es 0,2 [l/s]. Por tanto, podemos calcular la potencia necesaria para una cabeza de trabajo de 10 [m]. Para esto, vamos a tomar como referencia [26], haciendo uso de la ecuación (1) podemos calcular la potencia del mismo. En la Tabla 1.A podemos observar la magnitud de los demás parámetros.

$$P = \frac{1}{\eta} \rho Q g H \quad (1)$$

Tabla 1.A Parámetros de estudio.

Parámetro	Valor
$\rho$	1000 $[\frac{kg}{m^3}]$
$Q$	0,0002 $[\frac{m^3}{s}]$
$g$	9,81 $[\frac{m}{s^2}]$
$H$	10[m]

Obteniendo una potencia mínima requerida para la bomba de: 1,981[kW]. Con esto en consideración se selecciona la electrobomba Superficial Centrífuga 3HP [27]. Teniendo en mente la información del sistema de riego, y la energía promedio requerida por el agricultor en la figura 3, podemos obtener el perfil de carga diario del mismo. Este se presenta en la figura 4.

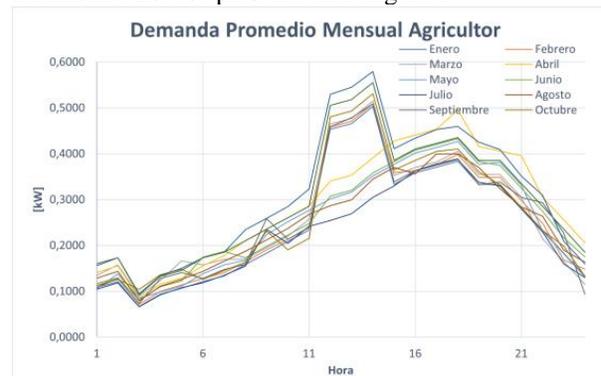


Figura 4. Perfil de carga horario mensual del agricultor.

### 3.2.2 Tipo de Panel Solar

Para seleccionar el módulo fotovoltaico, se realiza una búsqueda de paneles solares disponibles en el mercado, tanto nacional como internacional, teniendo como base de datos proyectos *AgroPV* internacionales y el software de simulación HOMER Pro. Se evalúa principalmente el tipo de panel, la eficiencia y el precio en el mercado.

En este caso, es importante destacar que los paneles solares monocristalinos suelen tener una mayor eficiencia energética, lo que significa que pueden generar más electricidad por unidad de superficie. Son más eficientes en condiciones de baja luminosidad y ocupan menos espacio en comparación con los paneles policristalinos. No obstante, los paneles solares policristalinos son generalmente más fáciles de fabricar que los monocristalinos. Por tanto, para nuestro contexto, debemos priorizar tanto el espacio limitado con la máxima eficiencia posible, siendo los paneles monocristalinos la mejor opción. Por tanto, se procede a

seleccionar el panel Solar 380W 24V Monocristalino JA Solar [28], disponible en el mercado Colombiano.

Teniendo en cuenta la selección del panel, procedemos a escoger el inversor DC/AC Leonic APOLLO S-210p 5 [kW], por su versatilidad, calidad, compatibilidad y rendimiento en la implementación con sistemas fotovoltaicos [21].

### 3.2.3 Altura de la estructura

La altura de la estructura que soporta los paneles fotovoltaicos, depende estrictamente de los requerimientos de espacio del cultivo, ya que, no se utiliza maquinaria externa para su mantenimiento y cosecha. Esto, teniendo en mente que generalmente se utilizan guadañas, tijeras de altura o motosierras para hacer podas y corte de frutas. En la figura 5 se pueden apreciar las diferentes configuraciones de sistemas *AgroPV*.

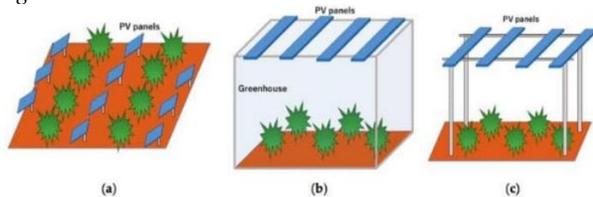


Figura 5. Configuraciones del sistema agrivoltaico (a) sin estructura (b) en invernadero (c) con estructura. Fuente: [29].

Si bien es cierto que a mayor altura de la estructura de soporte, la homogeneidad de la radiación disponible en la superficie es mayor [29], a mayor altura, el costo económico aumenta de manera significativa. Por tanto, es de vital importancia optar por la mínima altura posible, utilizando la configuración (c). En este caso, el árbol de cacao alcanza una altura máxima de 3,5 [m] en plantaciones controladas, es decir, teniendo en cuenta la altitud y pendiente del cultivo [25]. Por tanto, se elige una altura de 4,0 [m].

### 3.2.4 Orientación de los Paneles

Se desea que los paneles solares se instalen sobre los cultivos de cacao, direccionados hacia la misma orientación del campo en cuestión. Esto, para obtener un potencial fotovoltaico más significativo durante el día [30]. Haciendo uso de la plataforma Photovoltaic Geographical Information System, obtenemos que este valor corresponde a 42°NE.

### 3.2.5 Inclinación de los Paneles

Se puede evaluar el seguimiento de radiación solar para sistemas *AgroPV*, bajo 3 posibles modalidades. Estas son fijo inclinado, Control Tracking (CT) y Sun Tracking (ST). Estas dos últimas opciones funcionan con un sistema con eje orientado de norte-sur, donde es vital conocer la posición del sol durante todo el día para todo el año. De esta forma, se permite configurar una serie de parámetros y ángulos solares [31], que permitan maximizar la irradiación sobre los mismos. Es decir, se tiene que los paneles solares se moverán de forma paralela a los rayos del sol en las horas de menor radiación, y así minimizar la sombra producida por su presencia en el cultivo, para luego cambiar a una modalidad de seguimiento solar tradicional durante el resto del día, maximizando tanto la sombra a los cultivos, como también la generación de energía en las horas de mayor radiación [31]. En la figura 6 podemos observar la disposición de los paneles con seguimiento solar.

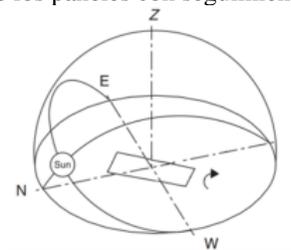


Figura 6. Disposición de los paneles solares con seguimiento solar.

Teniendo esto en mente, si bien se ha demostrado que para proyectos a gran escala estas dos configuraciones resultan ser las más efectivas [32], dada las especificaciones técnicas del proyecto, el presupuesto, la caracterización y su ubicación municipal, el costo de inversión es muy alto y no genera beneficio. Por tanto, se va a optar por un seguimiento de control fijo. No obstante, podemos mejorar la eficiencia del mismo, con una configuración opuesta. Es decir, por cada hilera se oponen dos paneles con el mismo ángulo de inclinación [32]. Podemos ver un ejemplo de la configuración en la figura 7.



Figura 7. Configuración sistema fijo inclinado. Fuente: [33].

Consecuentemente, procedemos a obtener el ángulo de inclinación óptimo, haciendo uso de los datos obtenidos en la plataforma de GHI. Este ángulo corresponde a  $16^\circ$ .

### 3.2.6 Distancia entre los Paneles

Tomando en consideración la información recolectada, el tipo de panel solar seleccionado es JA Solar. Con la finalidad de obtener un diseño simétrico, el cual cumpla con los requerimientos energéticos necesarios, la configuración fotovoltaica va a tener un total de 30 módulos fotovoltaicos. Así mismo, se espera que los módulos solares actúen como sistemas de protección para los árboles de cacao contra eventos climáticos, tales como la lluvia y granizos, la instalación de paneles solares será sobre estos.

Por otro lado, para obtener la distancia mínima entre paneles, evitando sombreado o colisión entre ellos, depende de la inclinación que tenga el panel solar. De igual forma, se considera el diseño del arreglo SAF. Según [31], se obtiene que para el ángulo de inclinación esta distancia corresponde a 1,8 [m]. Por tanto, se tienen 3 columnas, cada una con 10 módulos. Cada columna está constituida por 5 *strings* de 2 paneles solares cada uno, separados entre sí por 0,5 [m]. Así mismo, para permitir el ingreso de maquinaria, vamos a permitir una distancia entre columnas de 3,5 [m]. De esta forma, el trazado del cultivo normalmente se realiza por cuadrante con maderas finas tropicales. No obstante, recordamos que estamos evaluando un escenario base ideal en donde la plantación sólo está compuesta por cacao. Del mismo modo, estas medidas no afectan negativamente el desarrollo de la planta de cacao.

Una vez realizamos un check list por requerimientos técnicos del sistema *AgroPV* [31], en la figura 8 observamos la distancia final entre paneles dentro del sistema.

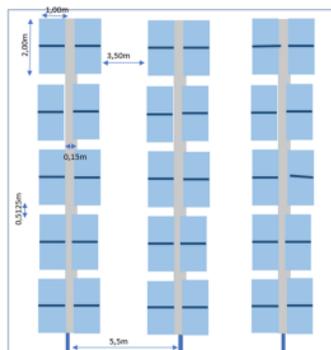


Figura 8. Distanciamiento de paneles en el sistema.

Tomando en consideración las características de diseño del sistema, presentamos una bocetación gráfica para

tener una idea del mismo. Estos se construyeron teniendo en mente la distribución presentada en la figura 7. Dentro de los gráficos, se presentan las dimensiones iniciales de la estructura, los paneles solares, el distanciamiento definido y el equipo de riego (motobomba). Es importante mencionar que no se encuentra a escala, ya que son bocetos, con la finalidad de facilitar la visualización al lector. Se presenta sobre el plano frontal en la figura 9, el plano superior en la figura 10 y el plano lateral en la figura 11.

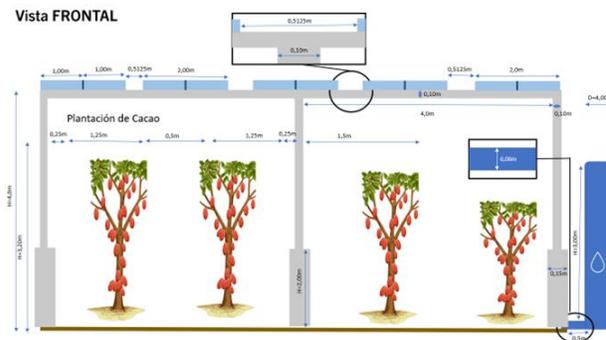


Figura 9. Vista frontal sistema agrivoltaico.

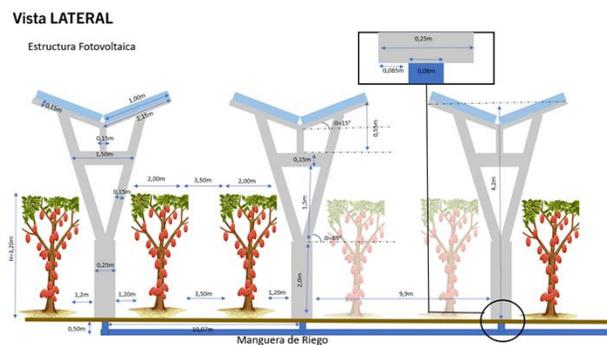


Figura 10. Vista superior sistema agrivoltaico.

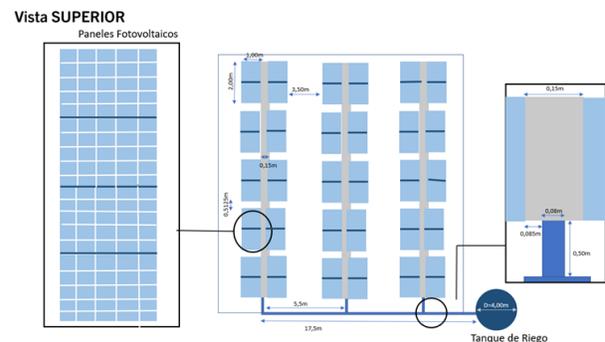


Figura 11. Vista lateral sistema agrivoltaico.

#### 4. Resultados y Análisis de Resultados

Tomando en consideración la información presentada en la anterior sección, se presenta tanto la implementación en Revit como HOMER Pro, para proceder con los respectivos análisis de viabilidad del sistema *AgroPV* y finalizar con la discusión de estos.

##### 4.1. Implementación en Revit

Teniendo en mente la bocetación del sistema *AgroPV*, procedemos a implementar el diseño en Autodesk Revit, para realizar un seguimiento solar del mismo. Es importante mencionar que se importan paquetes de familias dentro del programa, para la creación de los paneles, los cultivos, la estructura y el bombeo. Es decir, son equipos predispuestos para su uso, los cuales se van adaptar a los requerimientos de nuestro sistema. De esta forma, el diseño se realiza con equipos existentes en el mercado, se mantienen escalas y dimensiones definidas durante la caracterización técnica del mismo. De la misma manera, para generar el seguimiento solar se ingresan las coordenadas en donde se encuentra ubicado el proyecto, y el día del estudio. Es decir, la herramienta utiliza la base de datos de la NASA, utilizando la irradiación diaria del mismo. Este corresponde al 1 de mayo del 2023. Con esto en mente, estas se presentan a continuación en las figuras 12, 13, 14 y 15.

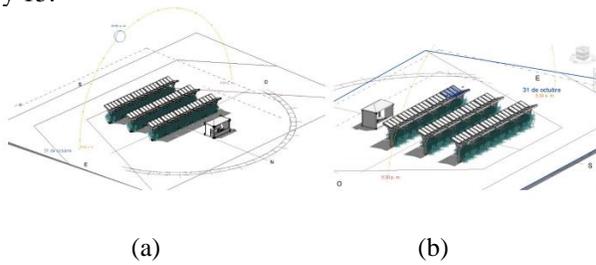


Figura 12. Visualización línea oculta sistema agrivoltaico (a) lejos (b) cerca.

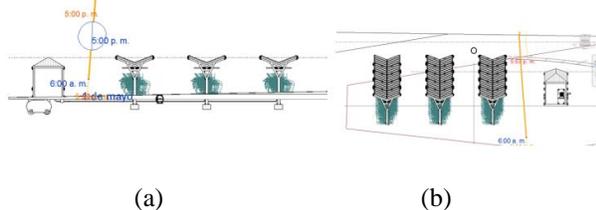


Figura 13. Visualización frontal sistema agrivoltaico (a) en terreno (b) elevado.

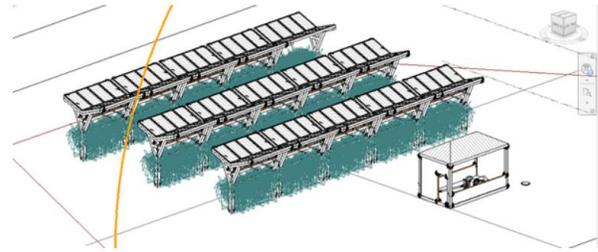


Figura 14. Visualización lateral sistema agrivoltaico.

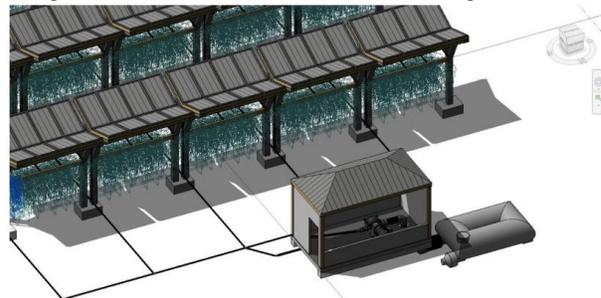


Figura 15. Visualización moto-momba sistema agrivoltaico.

Así como, el seguimiento solar en las figuras 16, 17, 18, 19, 20 y 21. Este se realiza durante un rango horario de 12 horas diurno, con intervalos de 1 hora, con la finalidad de evaluar los parámetros de diseño escogidos, así como el sombramiento presente en el cultivo.

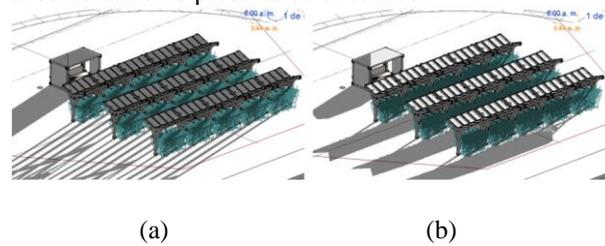


Figura 16. Visualización seguimiento solar (a) 6:00 am (b) 7:00 am.

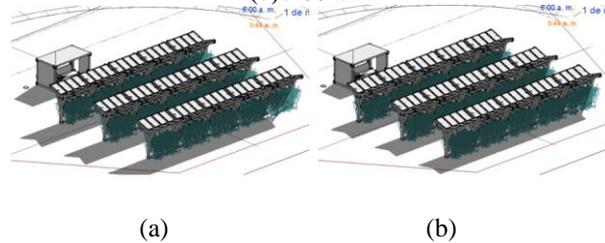


Figura 17. Visualización seguimiento solar (a) 8:00 am (b) 9:00 am.

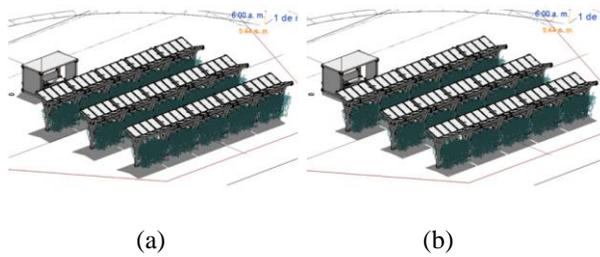


Figura 18. Visualización seguimiento solar (a) 10:00 am (b) 11:00 am.

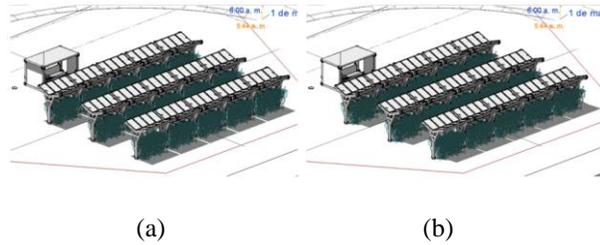


Figura 19. Visualización seguimiento solar (a) 12:00 pm (b) 1:00 pm.

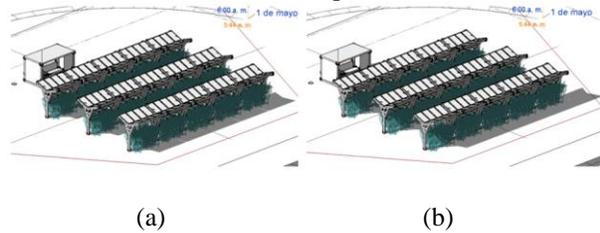


Figura 20. Visualización seguimiento solar (a) 2:00 pm (b) 3:00 pm.

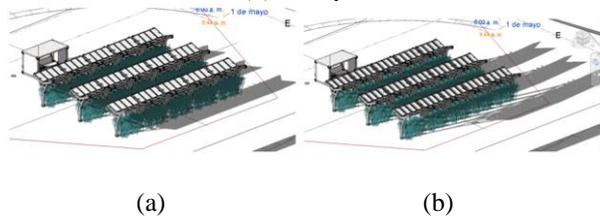


Figura 21. Visualización seguimiento solar (a) 4:00 pm (b) 5:00 pm.

En este caso, dentro de la herramienta podemos evaluar el porcentaje de sombreado presente en el terreno. Es decir, que tanta sombra recibe el cultivo durante el transcurso del día. Es importante mencionar, que no se tienen en cuenta parámetros externos relacionados a eventos climáticos que puedan afectar la toma de datos. En otras palabras, se está evaluando un escenario con condiciones ideales. Estos datos se pueden ver representados en la tabla 2.

Tabla 2.Sombreado presente en el cultivo.

Hora	Sombreado presente en el cultivo [%]
7:00 am	18,75
8:00 am	34,45
9:00 am	62,25
10:00 am	70,25
12:00 pm	92,25
1:00 pm	84,25
2:00 pm	70,25
3:00 pm	62,25
4:00 pm	43,55
5:00 pm	23,25

Tomando en consideración los resultados obtenidos, se puede concluir que el sistema cumple con uno de los principales requerimientos del mismo, el cual es reducir el estrés por sequía en las plantas. Esto, no solo favorece la reducción del consumo hídrico en el riego (baja humedad), sino estimular una mayor producción de cacao y disminuir el estrés por temperatura en el panel fotovoltaico.

#### 4.2. Simulación e Implementación Técnica en HOMER pro

En esta sección se presenta el montaje dentro de la plataforma HOMER pro. Para esto, definimos los componentes básicos de lo que sería nuestro sistema energético. En este caso, está compuesto por las celdas fotovoltaicas conectadas a un bus DC, un convertidor de DC/AC que transforma la potencia total producida en corriente continua (DC) para su almacenamiento, la respectiva batería de almacenamiento y la carga del sistema. Respecto a esto, recordemos que los parámetros a introducir dentro de la plataforma son la carga eléctrica promedio horaria mensual y la ubicación del sistema. En este caso, la vida útil del proyecto será de 10 años.

##### 4.2.1. Caso 1 - Aislado

Con esto en mente, en el primer escenario vamos a tener un sistema descentralizado que se encuentra aislado. Subsiguientemente, el sistema de generación se presenta en la figura 22.

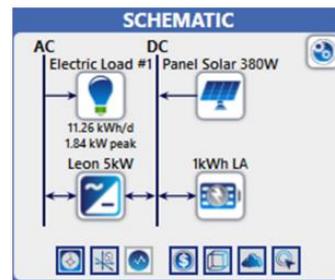


Figura 22.Sistema de generación aislado.

Inicialmente, obtenemos la producción eléctrica. Esta corresponde a 11.389 [kWh/yr], la cual satisface la demanda pronosticada de nuestro sistema. De hecho, existe un exceso de electricidad correspondiente al 3.257,25 [kWh/yr], es decir 28,6% de la producción total generada por el sistema. En la figura 23 podemos observar la producción eléctrica mensual.

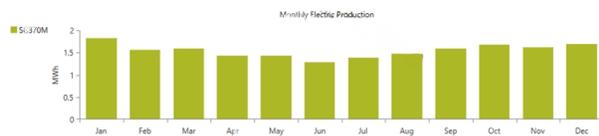


Figura 23. Producción eléctrica mensual Caso 1.

Es importante mencionar que en la tabla 3 podemos observar más a fondo las características técnicas del sistema solar fotovoltaico.

Tabla 3. Características técnicas del sistema solar fotovoltaico aislado.

Característica	Valor
Capacidad Instalada	11,1 [kW]
Energía producida anualmente	11.389 [kWh/yr]
Factor de Planta	19,1 [%]
Rendimiento energético	1.750 [kWh/kW]
Exceso energético	28,6 [%]

Por otra parte, el programa nos permite registrar las emisiones generadas por el sistema. En este caso, en la Figura 31 podemos observar que este valor corresponde a 0 [kg/yr].

Figura 24. Emisiones del sistema caso 1.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	0	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0	kg/yr

#### 4.2.2. Caso 2 - Conectado a la Red

En este caso, procedemos a conectar nuestro sistema con la red. Para esto, usamos el esquemático propuesto en la figura 22 y anexamos un grid. Dentro de este parámetro, configuramos el precio de la electricidad y reventa para la red, las interferencias dentro de la red, las emisiones de dióxido de carbono presente en la misma y finalmente un porcentaje de variabilidad para los tiempos de

reparación. Este va hacer del 5%. Consecuentemente, el sistema se representa en la figura 25.

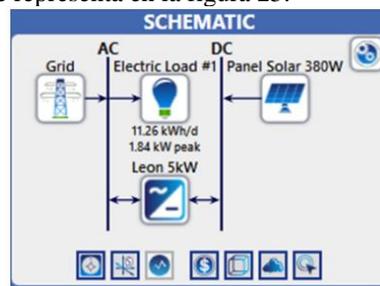


Figura 25. Sistema de generación conectado a la red.

De la misma manera, obtenemos la producción eléctrica. Esta corresponde a 8.131 [kWh/yr], la cual satisface la demanda pronosticada de nuestro sistema. De hecho, existe un exceso de electricidad correspondiente al 713.09 [kWh/yr], es decir 8,77% de la producción total generada por el sistema. En específico, el sistema PV genera 4.768 [kWh/yr] un 58,64%, mientras que las compras en la red corresponden a 3.363 [kWh/yr] un 41,36%. En la figura 26 podemos observar la producción eléctrica mensual.

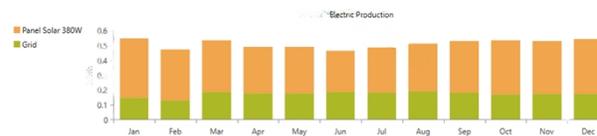


Figura 26. Producción eléctrica mensual Caso 2

Es importante mencionar que en la tabla 4 podemos observar más a fondo las características técnicas del sistema solar fotovoltaico.

Tabla 4. Características técnicas del sistema solar fotovoltaico conectado a la red.

Característica	Valor
Capacidad Instalada	11,1 [kW]
Energía producida anualmente	8.131 [kWh/yr]
Energía producida PV anualmente	4.768 [kWh/yr]
Compras por Red anualmente	3.363 [kWh/yr]
Factor de Planta	19,03 [%]
Rendimiento energético	1.750 [kWh/kW]
Exceso energético	8,77 [%]

Por otra parte, el programa nos permite registrar las emisiones generadas por el sistema. En este caso, en la figura 27 podemos observar que este valor corresponde a 1.333,55 [kg/yr].

Figura 27. Emisiones del sistema caso 2.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	1,325	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	5.74	kg/yr
Nitrogen Oxides	2.81	kg/yr

### 4.3. Análisis Económico

En esta sección, se analizan los costos involucrados en la evaluación económica del proyecto *AgroPV*, considerando la inversión y operación. Se estudian en separado los aspectos agrícolas y energéticos mediante un análisis de CAPEX y OPEX. En estos, se identifican los costos afectados al instalar el proyecto en un campo de cultivo existente, incluyendo la inversión en la planta fotovoltaica, la producción del cultivo y la generación de energía. Se supone que la instalación de la estructura fotovoltaica se realiza sobre campos previamente cultivados y cosechados, por lo que no se consideran los costos de inversión y mantenimiento agrícolas. Así mismo, el software HOMER Pro no tiene en cuenta costos de infraestructura como lo son la elevación del suelo o infraestructura relacionado con la Motobomba. Por tanto, este se estima para ambos escenarios.

Primeramente, se analiza el componente agrícola, ya que este no cambia en los dos escenarios. De esta forma, para el componente agrícola, en la semana del 8 al 14 de mayo del 2023, el precio del cacao criollo es 11.858,30 [\$/Kg] [35]. Así mismo, se estima una producción de 450 kilogramos de cacao seco por hectárea al año, en el departamento del Meta [36]. Por tanto teniendo en mente, que para 0.044 hectáreas se estima una producción de 19,8 kilogramos sin un sistema *AgroPV*. Vamos a suponer 3 escenarios siendo estos el optimista, ideal y el sin *AgroPV*. En el primero el rendimiento del cultivo aumenta en un 20%, en el segundo un 10% y en el tercero no aumenta, con respecto a la producción esperada. En la tabla 5 tenemos la utilidad del cultivo para los tres escenarios.

Tabla 5. Utilidad del cultivo de cacao con APV.

Escenario	Producción [kg]	Precio [COP]
Optimista	23,76	281.753,21
Ideal	21,78	258.273,77
Sin <i>AgroPV</i>	19,8	234.794,34

Obtenemos un beneficio anual por cosecha estimado en el escenario optimista de \$46.958,89 [COP] y en el

escenario ideal de \$23.479,43 [COP]. Subsecuentemente, procedemos con el análisis económico de los escenarios.

#### 4.3.1. Caso 1 - Aislado

En primer lugar, el proyecto requiere de una inversión inicial correspondiente a la adquisición de tecnologías correspondiente \$66.014.554,44 [COP]. En la tabla 6 podemos observar más a fondo de donde proviene esta cifra. Así mismo, que durante el transcurso del mismo, se debe realizar un desembolso correspondiente a una sustitución, correspondiente al cambio de baterías de \$16.683.094,6 [COP].

Tabla 6. Inversión del proyecto caso 1.

Componente	Capital [\$]	Replacement [\$]	O&M [\$]	Salvamento [\$]	Total [\$]
Generic kWh Acido de Plomo	28.843.380,00	16.683.094,6	7.115.954,46	(15.568.987,69)	37.073.399,56
Panel Solar 380W	34.474.360,21	0,00	0,00	(12.976.845,67)	21.497.514,54
Leomics S-219Cp 5kW	2.696.814,23	0,00	0,00	0,00	2.696.814,23
Sistema	<b>66.014.554,44</b>	16.683.094,6	7.854.428,59	(28.545.833,36)	61.267.728,33

Por otro lado, de acuerdo con las experiencias internacionales, los sistemas *AgroPV* requieren una inversión mayor en comparación con los sistemas fotovoltaicos convencionales instalados en el suelo. Esto se debe principalmente al costo de los módulos, la estructura necesaria y su instalación, los requisitos de preparación del terreno y, en general, toda la mano de obra necesaria. En un análisis económico realizado en [36], se demostró que los sistemas *AgroPV* tienen una inversión más alta en un 50% en comparación con los sistemas PVGM (PV Ground Mounted), debido a la infraestructura y la instalación. Además, según las experiencias en Alemania y Vietnam, se observa un aumento del 30% en el valor de la inversión para el sistema diseñado.

La tabla 7 muestra los costos asociados a las obras civiles y estructura. Para estimar este último costo, se utilizó un estudio realizado por la Financiera de Desarrollo Nacional (FND), el cual determinó que el 27% del costo de inversión inicial (CAPEX) correspondiente a la tecnología solar se destina a las obras civiles. Este valor se va usar de referente para el escenario 2.

Tabla 7. Inversión sistema APV proyecto caso 1.

Item	Total [\$]
CAPEX	66.014.554,44
Obras Civiles y Estructura (27%)	17.823.929,7
Inversión Total	83.838.484,14

Finalmente, en la tabla 8 podemos visualizar parámetros de gran importancia para el proyecto, tales como lo son el Capex, el costo actual neto (NPC), el costo medio por

kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema (LCOE) y el costo de operación.

Tabla 8. Indicadores económicos del proyecto caso 1.

NPC [\$]	61.267.728,33
LCOE [\$/kWh]	1.858,55
Operating Cost [\$/yr]	641.368,08
Inversión Total [\$]	83.838.484,14

Por otro lado, podemos calcular el ahorro mensualmente existente al no pagar la tarifa de energía, por lo que la energía mensual es generada gracias al sistema. En este caso, este cálculo se realiza para la vida útil del proyecto, es decir 10 años. Tenemos que el valor facturado por kW consumido promedio es 696,72 [\$/kWh]. Por tanto, para un consumo anual de 2.494,93 [kWh/yr] el agricultor se estaría ahorrando \$1.736.874,19 [COP], lo que en la vida útil del proyecto significa \$17.368.741,9 [COP]. Obteniendo uno de los beneficios que representa esta tecnología como medio de generación local.

No obstante, la gran desventaja que representa este sistema es que al ser 100% aislado no existe forma de vender los excedentes a la red. Es decir, estamos hablando de energía perdida, la cual representa pérdidas al agricultor.

#### 4.3.2. Caso 2 - Conectado a la Red

Consecuentemente, el proyecto requiere de una inversión inicial correspondiente a \$37.171.174,44 [COP]. En la tabla 9 podemos observar más a fondo de donde proviene esta cifra. Así mismo, que durante el transcurso del mismo, existe un costo de operación correspondiente a \$9.289.115,03 [COP] anuales. Esto, nos refleja tanto una disminución significativa en la inversión del proyecto, gracias a que no necesitan baterías para almacenar la energía sobrante, así como, la manutención del mismo cuando lo comparamos con el caso 1. Es decir, a corto plazo, el proyecto de estudio que resulta más rentable es el caso 2. Ya que requiere tanto una inversión aproximada del 42,3% menor que el escenario 1.

Tabla 9. Inversión del proyecto caso 2.

Componente	Capital [\$]	Replacement [\$]	O&M [\$]	Salvamento [\$]	Total [\$]
Grid	0,00	0,00	9.289.115,03	0,00	9.289.115,03
Panel Solar 380W	34.474.360,21	0,00	0,00	(12.976.845,67)	21.497.514,54
Leonics S.219Cp 5kW	2.696.814,23	0,00	0,00	0,00	2.696.814,23
Sistema	<b>37.171.174,44</b>	0,00	9.289.115,03	(12.976.845,67)	33.483.443,8

Así mismo, en la tabla 10 muestra los costos asociados a las obras civiles y estructura. Para estimar este último costo, se utiliza el mismo valor del primer escenario.

Tabla 10. Inversión sistema APV proyecto caso 2.

Item	Total [\$]
CAPEX	37.171.174,44
Obras Civiles y Estructura (27 %)	17.823.929,7
Inversión Total	54.995.104,14

De la misma manera, en la tabla 11 podemos visualizar parámetros de gran importancia para el proyecto, tales como lo son el Capex, el costo actual neto (NPC), el costo medio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema (LCOE) y el costo de operación.

Tabla 11. Indicadores económicos del proyecto caso 2.

NPC [\$]	33.483.443,8
LCOE [\$/kWh]	447,28
Operating Cost [\$/yr]	921.316,08
CAPEX [\$]	37.171.174,44
Inversión Total [\$]	54.995.104,14

En este caso, cuando comparamos el costo medio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema (LCOE), nos damos cuenta que el escenario 1 presenta un costo más elevado. Esto, gracias a que es un sistema 100% aislado y descentralizado, lo cual aumenta tanto la inversión inicial como los costos de mantenimiento. No obstante, el costo de operación para ambos escenarios es muy similar. Siendo el del caso 1, levemente mayor. Asimismo, es importante mencionar que al comparar estos indicadores con otras tecnologías como las energías convencionales o la energía nuclear, estos valores representan precios competitivos en el mercado. Destacando, que se deben tener en cuenta factores tales como la rentabilidad, sostenibilidad, estabilidad del sistema y seguridad del mismo.

Finalmente, en la tabla 12 observamos la información referente a la compra y venta de energía por parte de nuestro sistema a la red. En este caso, la energía en exceso producida por el sistema gracias a *la resolución CREG 174 de 2021 y CREG 135 de 2021*, los usuarios a través de un sistema fotovoltaico pueden venderla. En otras palabras, en esta resolución, se estipulan los mecanismos para que los usuarios que generen energía eléctrica para su propio consumo, puedan conectarse a la red pública y vender sus excedentes. De esta forma, el sistema propuesto se aplica como autogenerador a pequeña escala (AGPE), ya que, es un sistema de autogeneración menor o igual a 1MW.

Tabla 12. Compra y venta de energía caso 2.

Mes	Energía Comprada [kWh]	Energía Vendida [kWh]	Energía Neta Comprada [kWh]	Precio Energía [\$]
Enero	150	163	-13	58.397,39
Febrero	133	131	2	54.677,02
Marzo	188	125	63	90.668,54
Abril	179	116	63	86.906,36
Mayo	179	114	65	87.157,17
Junio	186	96	90	95.642,98
Julio	183	104	79	92.131,61
Agosto	191	111	80	95.601,17
Septiembre	182	135	47	84.356,44
Octubre	171	144	27	75.410,81
Noviembre	176	140	36	79.800,02
Diciembre	177	143	34	79.549,21
Total	2096	1511	574	980.340,50

Uno de los principales beneficios de conectar el sistema a la red, es la generación de excedentes. De esta forma, no solo genera ingresos, sino que contribuye a mejorar la calidad de suministro del sistema para la población de la zona.

En conclusión la implementación de ambos escenarios es rentable, ambos presentan tanto ventajas como desventajas. Sin embargo, queremos saber cuál es más ventajoso para el agricultor. Por un lado, el escenario 1 no contribuye con emisiones al ambiente, se ahorra la tarifa de pagar el servicio eléctrico y es un sistema tanto 100% aislado como descentralizado que no está expuesto a los inconvenientes de la red. No obstante, representa un costo de inversión bastante elevado, con pérdidas de energía considerables para el agricultor, los cuales no pueden vender a la red, al no estar conectada a la misma, generando ingresos en un periodo mediano.

Por otro lado, el escenario 2 si incorpora emisiones al medio ambiente a consecuencia del mix tecnológico usado para la producción de electricidad. Asimismo, si bien se paga una tarifa por la prestación del servicio, se generan ingresos al vender sus excedentes a la red, es completamente autónomo, y no necesita de un elevado costo de inversión. Con estos criterios en mente, el escenario a recomendar para la implementación de un agricultor de cacao en Cabuyaro, resulta ser la opción 2, es decir, conectar el sistema a la red. No obstante, evaluando la opción en la que el agricultor desea implementar el escenario 1, se encuentra en la posibilidad de por un lado aumentar su perfil de carga. Es decir, considerar otros usos de la energía a generarse, como lo serían para el secamiento, la transformación del grano e incluso la demanda de los hogares rurales cacaoteros. De hecho, uno de los desafíos que presenta el desarrollo de una red de valor del cultivo de cacao es la baja tecnificación del cultivo y los altos costos de transacción por la presencia de intermediarios, por esto, es importante el incentivo de la asistencia técnica y la mecanización de la actividad agro [36].

#### 4.4. Discusión

En esta sección, se discute sobre el marco de los proyectos *AgroPV* para Colombia en términos de beneficios, desafíos y sostenibilidad con base en el proyecto bajo estudio. Es importante señalar que la eficacia y los beneficios de la tecnología *AgroPV* pueden variar en función de factores como la ubicación, el clima, el tipo de cultivo y el diseño del sistema. Más en general, la tecnología *AgroPV* ofrece un enfoque prometedor para abordar el doble reto de la producción de alimentos y energía de forma sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Estos comprenden:

- **Mayor productividad:** La tecnología *AgroPV* permite un doble uso de la tierra, con cultivos o vegetación debajo de los paneles solares. Esto optimiza el uso de la tierra, permitiendo a los agricultores generar energía renovable sin dejar de utilizar la tierra para la agricultura. En otras palabras, ayuda a maximizar la productividad de la tierra y puede aumentar potencialmente el rendimiento general de los cultivos.
- **Resiliencia climática:** La sombra que proporcionan los paneles solares de los sistemas *AgroPV* puede ayudar a mitigar el impacto de fenómenos meteorológicos extremos como olas de calor, sequías o lluvias torrenciales. Crea un microclima que reduce las fluctuaciones de temperatura y protege los cultivos de la luz solar directa, el granizo y los daños causados por el viento.
- **Generación de energía eléctrica renovable:** La tecnología *AgroPV* contribuye a la producción de energía limpia y renovable. Mediante la instalación de paneles solares en terrenos agrícolas, los agricultores pueden generar electricidad para su propio uso y/o inyectarla a la red. Esto diversifica las fuentes de ingresos, reduce la dependencia de los combustibles fósiles y favorece la transición hacia un sistema energético sostenible.
- **Beneficios económicos:** Los sistemas *AgroPV* pueden proporcionar fuentes de ingresos adicionales a los agricultores. Pueden vender la electricidad generada por los paneles solares, beneficiándose potencialmente de tarifas de alimentación u otros programas de incentivos.
- **Beneficios medioambientales:** La tecnología *AgroPV* ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al generar energía limpia y promover el uso sostenible de la tierra.

Finalmente, a medida que la tecnología *AgroPV* avanza y se desarrolla, se espera que se aborden y superen diferentes desafíos o retos a través de la investigación, la innovación y la colaboración entre la comunidad agrícola y la industria de la energía solar. Entre los que se encuentran:

- *Aspectos económicos y regulación:* La viabilidad económica de la tecnología *AgroPV* y su integración en los marcos regulatorios actuales son desafíos importantes. Actualmente no existe un análisis detallado de los costos y beneficios, así como la identificación de posibles incentivos o esquemas de apoyo que promuevan la adopción de esta tecnología.
- *Mantenimiento y operación:* Los sistemas *AgroPV* requieren un mantenimiento adecuado para garantizar el rendimiento óptimo tanto de los paneles solares como de los cultivos. Por ejemplo, el alto impacto sobre la mano de obra que esto pueda generar. No obstante, no existe información pertinente sobre la limpieza regular de los paneles solares, el control de malezas y plagas en los cultivos, y la monitorización continua de los sistemas.

#### 4.5. Conclusiones

El objetivo general de este trabajo es evaluar la viabilidad energética que representan los cultivos de cacao en el municipio de Cabuyaro, Meta, con base a la tecnología *AgroPV*. En este caso, inicialmente se analizó el papel de los cultivos de cacao dentro de la tecnología *AgroPV*, que permitan establecer beneficios a los productores. En este caso, se encontraron 4 beneficios principales. Estos son:

- *Protección contra el estrés por calor:* El cacao es una planta tropical que prefiere condiciones de sombra a altas temperaturas o moderadas. La sombra proporcionada por el sistema ayudaría a reducir la temperatura del entorno, evitando el estrés por calor en las plantas de cacao. Esto favorece un mejor crecimiento y desarrollo de los árboles de cacao.
- *Regulación de la humedad del suelo:* La sombra generada por la infraestructura, ayuda a mantener una mayor humedad en el suelo, ya que reduce la evaporación directa causada por la radiación solar directa. Esto es especialmente beneficioso en regiones con estaciones secas pronunciadas. Asimismo, a mayor disponibilidad de agua en el suelo, mejor crecimiento de las raíces y mejor capacidad de resistencia a la sequía.

- *Protección contra vientos fuertes:* Los árboles de sombra actúan como barreras naturales contra vientos fuertes, protegiendo a los árboles de cacao de posibles daños causados por ráfagas de viento. Esto es especialmente relevante en áreas propensas a tormentas tropicales o huracanes.
- *Calidad del cacao:* La sombra adecuada puede influir positivamente en la calidad del cacao. La maduración más lenta de los frutos bajo la sombra suele conducir a un mayor contenido de azúcar y sabores más complejos en los granos de cacao. Esto puede mejorar la calidad y el valor de los productos derivados del cacao, como el chocolate.

En este caso, se evaluó la alternativa de electrificación con tecnología *AgroPV* en el municipio de Cabuyaro, para determinar su prefactibilidad e implementación. Para esto, se plantearon dos escenarios, uno 100% descentralizado y el otro conectado a la red. En la Tabla 13 se presenta la información.

Tabla 13. Resumen escenarios.

Parametro/ Escenario	Escenario 1	Escenario 2
Generación [kWh/yr]	11.389	8.131
Excedentes de Generación [kWh/yr]	3.257,25	713
Generación de Emisiones [kg/yr]	0	1.333,55
Inversión Total [COP]	\$ 83.838.484,14	\$ 54.995.104,14
Compra/Venta [COP]	\$ +1.736.874,19	\$ -980.340,50

En resumen, visualizando la tabla 13, tanto el escenario 1 como el escenario 2 son rentables, pero el escenario 1 representa un proyecto de inversión muy grande, el cual no se ve justificado por el ahorro de no pagar la tarifa de electricidad, ni generar emisiones al medio ambiente. De esta forma, para un agricultor de cacao en Cabuyaro se recomendaría implementar el escenario 2 gracias a su inversión inicial relativamente baja, la generación de ganancias anuales, ingresos por venta de excedentes, y menor costo por producción de energía.

Es importante mencionar que, con el fin de promover el desarrollo de esta tecnología a futuro, se destacan 5 beneficios asociados al despliegue del *AgroPV*. Siendo estos: Mayor productividad, Resiliencia climática, Generación de energía renovable, Beneficios económicos y Beneficios medioambientales.

Igualmente, si bien este trabajo es un análisis teórico de un proyecto *AgroPV*, demuestra la necesidad y pertinencia de implementar un piloto para obtener un

análisis de campo. Y de esta forma, inferir, extraer y concluir nueva información sobre esta creciente tecnología.

En perspectiva de futuras investigaciones, se contempla el desarrollo de microrredes que integren sistemas *AgroPV*, buscando una sinergia efectiva entre la sombra natural y los módulos solares. Este enfoque tiene como objetivo optimizar la eficiencia y sostenibilidad de la generación de energía solar en contextos agrícolas, representando un área prometedora para la innovación y el progreso en la convergencia de la agricultura y la energía renovable. Así mismo, evaluar la complementariedad que representa la sombra natural y los módulos solares.

#### 4.6. Conflicto interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### 5. Referencias

- [1] H. Marrou, “Co-locating food and energy,” *Nature Sustainability*, vol. 2, no 9, p. 793-794, 2019.
- [2] C. Toledo, A. Scognamiglio, “Agrivoltaic systems design and assessment: A critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (three-dimensional agrivoltaic patterns,” *Sustainability*, vol. 13, no 12, p. 6871, 2021.
- [3] P. Donald, “Biodiversity impacts of some agricultural commodity production systems,” *Conservation biology*, vol. 18, no 1, p. 17-37, 2004.
- [4] M. Giampietro, S. Bukkens, D. Pimentel, “General trends of technological changes in agriculture,” *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 18, no 3, p. 261-282, 1999.
- [5] H. Dinesh, J. Pearce, “The potential of agrivoltaic systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, p. 299-308, 2016.
- [6] R. Brohm, N. Khanh, “Dual Use Approaches for Solar Energy and Food Production—International Experience and Potentials for Vietnam,” *Green Innovation and Development Centre (GreenID): Hanoi, Vietnam*, p. 51-52, 2018.
- [7] J. Gómez Ramírez, “La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas”, trabajo de grado, Universidad Santo Tomás, 2017.
- [8] Statista, “Valor aportado de la agricultura, pesca, caza, silvicultura y ganadería al producto interno bruto (PIB) en Colombia de 2005 a 2021”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/valoraportadopib>. [Accedido: 24-04-2023].
- [9] Departamento Nacional de Planeación, “Colombia ha aumentado su oferta exportadora en los productos agropecuarios, alimentos y bebidas”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://2022.dnp.gov.co/Paginas/Colombia-aumento-exportacion-agropecuaria-alimentos-y-bebidas.aspx>. [Accedido: 26-04-2023].
- [10] Sacristan. J.F, “Más de 15 millones de personas en Colombia podrían pasar hambre en el segundo semestre: Naciones Unidas la declaró en “estrecha vigilancia””, 2023. [En línea] Disponible en: <https://www.infobae.com/colombia/2023/05/29/mas-de-15-millones-de-personas-en-colombia-podrian-pasar-hambre-en-el-segundo-semestre-naciones-unidas-la-declaro-en-estrecha-vigilancia> [Accedido: 31-08-2023]
- [11] M. Pabón, “Caracterización socio-económica y productiva del cultivo de cacao en el departamento de Santander (Colombia),” *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. 38, no 1345-2016-104520, p. 283-294, 2016.
- [12] E.J. Sacristán, F. Rojas, “Guía ambiental para el cultivo del cacao”, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Bogotá D.C, 2009.
- [13] R. Jing, Y. He, J. He, Y. Liu, S. Yang, “Global sensitivity based prioritizing the parametric uncertainties in economic analysis when co-locating photovoltaic with agriculture and aquaculture in China,” *Renewable Energy*, vol. 194, no 1048-1059, 2022.
- [14] M. Tajima, T Iida, “Evolution of agrivoltaic farms in Japan,” In *AIP Conference Proceedings*, vol. 2361, no. 1, p. 030002). AIP Publishing LLC, 2021.
- [15] R. Gonocruz, R. Nakamura, K. Yoshino, M. Homma, T. Doi, Y. Yoshida, A. Tani, “Analysis of the rice yield under an Agrivoltaic system: A case study in Japan,” *Environments*, vol. 8, no 7, p. 65, 2021.
- [16] D. Majumdar, M. Pasqualetti, “Dual use of agricultural land: Introducing ‘agrivoltaics’ in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA,” *Landscape and urban planning*, vol. 170, p. 150-168, 2018.
- [17] M. Tajima, C. Doedt, T. Iida, “Comparative study on the land-use policy reforms to promote agrivoltaics,” In *AIP Conference Proceedings*, vol. 2635, no 1, p. 050003, 2022. AIP Publishing LLC.

- [18] P. Gese, F. Martínez-Conde G., Ramírez-Sagner, F. Dinter, “Agrivoltaic in Chile—Integrative solution to use efficiently land for food and energy production and generating potential synergy effects shown by a pilot plant in Metropolitan region,” In Proceedings of the International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC), Santiago de Chile, Chile, pp. 3-7, 2019.
- [19] A. Cusva García, “Análisis para determinar la viabilidad y potencialidad de sistemas agrofotovoltaicos en zonas agrícolas de Colombia”, trabajo de grado, Universidad de los Andes, 2022.
- [20] E. Céspedes Díaz, “Análisis computacional de sistemas agrovoltaic en Colombia”, trabajo de grado. Universidad de los Andes, 2022.
- [21] J. Rodríguez Rodríguez, “Evaluación de la rentabilidad económica y la viabilidad técnica de la tecnología agrivoltaica en el cultivo de arroz en Colombia”, trabajo de grado, Universidad del Rosario, 2021.
- [22] EMSA. Electrificadora del Meta, “Reporte Integrado de Gestión y Resultados 2021 EMSA”, 2021 [En línea]. Disponible en: <https://www.electrificadoradelmeta.com.co/newweb/wp-content/uploads/Reporte-Integrado-de-Gestion-y-Resultados-2021-EMSA.pdf> [Accedido: 28-04-2023].
- [23] Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI), “Reportes del Sector Energía”, 2022 [En línea]. Disponible en: <http://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia> [Accedido: 28-04-2023].
- [24] SuperIntendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “Diagnóstico de la Calidad del Servicio de Energía Eléctrica en Colombia”, 2022 [En línea]. Disponible en: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-de-Calidad-del-Servicio-de-Energia-2021.pdf> [Accedido: 28-04-2023].
- [25] A. Hernández Arango, “Sistema de riego automatizado por microaspersión para el cultivo de cacao en el Municipio de Cabuyaro, Meta”, trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco de Caldas, 2019.
- [26] Homecenter, “Electrobomba Superficial Centrífuga 3HP”, 2023 [En línea]. Disponible en: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/138268/electrobomba-superficial-centrifuga-3hp/138268/> [Accedido: 06-05-2023].
- [27] AutoSolar, “Panel Solar 380W 24V Monocristalino PERC JA Solar”, 2023 [En línea]. Disponible en: <https://autosolar.co/paneles-solares-24v/panel-solar-380w-24v-monocristalino-perc-ja-solar> [Accedido: 04-05-2023].
- [28] S. Gorjian, R. Singf, A. Shukla, A. Mazhar, “Photovoltaic Solar Energy Conversion, Chapter 6- On farm applications of solar PV systems”, Technologies, Applications and Environmental Impacts, p. 147-190, 2020.
- [29] A. Guerrero, “Modelos de Gestão de Energía para Pequeñas Micro Redes Fotovoltaicas No Contexto Colombiano,” trabajo de grado, Universidad Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba 2021.
- [30] S. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2da edición. Elsevier.
- [31] J. Chasco Santibáñez, “Propuesta de un sistema Agrivoltaico en frutales para el contexto chileno,” trabajo de grado, Universidad de Chile, 2023.
- [32] R. A. Bejarano, O. E. Paiva, J.I. Díaz, “Evaluación de sistemas de riego localizado en cultivo de cacao (Theobroma cacao) como estrategia de aumento de la producción en el departamento del Huila. Ingeniería y Región”, no 11, p. 45-55, 2014.
- [33] M. Vives Serrano, “Evaluación de energéticos para aplicaciones de bombeo en agricultura,” trabajo de grado, Universidad de los Andes, 2023.
- [34] DEFECACAO, “Precio de referencia semanal de compra de cacao - Fuente Industria - FEDECACAO - Exportadores”, 2023 [En línea]. Disponible en: <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Precio-de-referencia-semanal-de-compra-de-cacao---Fuente-Industria.aspx> [Accedido: 06-05-2023].
- [35] SIC, “Cadena Productiva del Cacao”, 2023 [En línea]. Disponible en: <https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Cacao.pdf> [Accedido: 06-05-2023].
- [36] S. Schindele, M. Trommsdorff, A. Schlaak, T. Obergfell, G. Bopp, C. Reise, C. Braun, A. Weselek, A. Bauerle, P. Högy, A. Goetzberger, E. Weber, “Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its

policy implications,” *Applied Energy*, vol. 26, no 114737, 2020.

[37] A. Agostini, M. Colaluzzi, S. Amaducci, “Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment”. *Applied Energy*, vol. 281, p. 116102, 2021.