



Título:

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

Subtítulo:

Optimización de la producción energética y agrícola mediante la implementación de modelos de agrovoltaica en predios rurales

Carlos Daniel Parra Hernandez

Proyecto presentado para optar al título de Ingeniero Civil.

Asesor

Wilfer David Guzmán López, Ingeniero Sanitario de la Escuela Ambiental.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

| | |
|----------------------------|---|
| Cita | (Parra Hernandez, 2024) |
| Referencia | (Parra Hernández, 2024). <i>Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia</i> [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. |
| Estilo APA 7 (2020) | |



Centro de documentación de ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - 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.

Dedicatoria

A mis padres, por su apoyo incondicional y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mi hermano por ser un modelo para seguir en mi vida y por enseñarme el apoyo incondicional de un verdadero hermano. A mi esposa por su apoyo y acompañamiento durante toda mi carrera impulsándome a ser cada vez mejor. A mis profesores y asesores, que han guiado mi camino académico con sabiduría y paciencia. A mis compañeros de estudio, por su amistad y colaboración constante. Y, finalmente, a Colombia, mi país, cuyo potencial en el desarrollo de energías renovables y agricultura sostenible me inspira a contribuir con mi granito de arena hacia un futuro más limpio y próspero.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas y entidades que han hecho posible la realización de este trabajo.

En primer lugar, agradezco a mis padres, hermano y novia por su constante apoyo emocional y financiero, y por creer en mí en cada etapa de mi formación académica.

Agradezco a mis profesores y asesores de la Universidad de Antioquia, en especial a mi asesor de prácticas, por su orientación y consejos valiosos que han enriquecido este proyecto. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para mi crecimiento profesional.

A la empresa ERCO de energía renovable donde realicé mis prácticas, por brindarme la oportunidad de aplicar mis conocimientos y adquirir experiencia en el campo de las energías renovables. Su confianza y apoyo han sido cruciales para el desarrollo de esta investigación.

A mis compañeros de estudio y amigos, por su colaboración, apoyo moral y por los momentos de alegría que han hecho de este proceso una experiencia memorable y enriquecedora.

Finalmente, agradezco a todas las fuentes de información y a los autores cuyos trabajos fueron consultados. Su investigación ha sido la base sobre la cual he podido construir este proyecto.

Gracias a todos por ser parte de este viaje y por contribuir de diversas maneras a mi formación y desarrollo profesional.

Tabla de contenido

| | |
|------------------------------------|----|
| Resumen | 8 |
| Abstract | 9 |
| Introducción | 11 |
| 1 Planteamiento del problema | 12 |
| 2 Justificación..... | 13 |
| 3 Objetivos | 14 |
| 3.1 Objetivo general | 14 |
| 3.2 Objetivos específicos..... | 14 |
| 4 Marco teórico | 14 |
| 5 Metodología | 17 |
| 6 Resultados | 19 |
| 7 Discusión | 27 |
| 8 Conclusiones | 28 |
| Referencias | 31 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 <i>Metodologia</i> | 17 |
| Figura 2 <i>Concepto de agrovoltica</i> | 20 |
| Figura 3 <i>Cueltivo bajo mesas con paneles</i> | 21 |
| Figura 4 <i>Cultivo entre mesas</i> | 22 |
| Figura 5 <i>Agrovolticos con animales</i> | 23 |
| Figura 6 <i>DANE. Encuesta Nacional Agropecueria</i> | 24 |

Siglas, acrónimos y abreviaturas

| | |
|--------------|--|
| ISE | Institute for Solar Energy Systems |
| LER | Land Equivalent Ratio |
| PV | Fotovoltaico |
| APV | Agrovoltaico |
| PIB | Producto Interno Bruto |
| ENA | Encuesta Nacional Agropecuaria |
| DANE | Departamento Administrativo Nacional de Estadística |
| PIEC | Plan Indicativo de Expansión de la Cobertura Eléctrica |
| UPME | Unidad de Planeación Minero-Energética |
| IDEAM | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia |
| UDEA | Universidad de Antioquia |
| GEI | Gases de Efecto Invernadero |

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

8

Resumen

La propuesta tiene como objetivo abordar la necesidad de transición energética en Colombia, donde la elección entre cultivos agrícolas y la instalación de plantas solares se presenta como un dilema para los propietarios de predios rurales. La solución propuesta consiste en la implementación de plantas solares agrovoltaicas, que combinan la producción de energía solar con actividades agrícolas en el mismo terreno. Este enfoque ofrece una solución innovadora y sostenible para la producción de energía limpia sin comprometer la producción de alimentos. Para ello será necesario hacer un análisis completo del contexto local, descripción de viabilidad técnica y económica, así como conclusiones sobre la implementación de estos modelos en los predios rurales del país, tecnologías disponibles y acordes a las características del territorio y garantizando el posible funcionamiento de estas plantas.

Además, se evidencia la necesidad de emplear las fuentes renovables como la energía solar, pero manteniendo un equilibrio con la productividad de las tierras agrícolas, para no generar un enfrentamiento entre el destino de los suelos para generación de energía o para uso agrícola.

Palabras clave: Energía solar, agricultura sostenible, agrovoltaica, transición energética, sostenibilidad, granjas solares, granjas fotovoltaicas.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

9

Abstract

The proposal aims to address the need for energy transition in Colombia, where the choice between agricultural crops and the installation of solar plants is presented as a dilemma for rural landowners. The proposed solution consists of the implementation of agrivoltaics solar plants, which combine the production of solar energy with agricultural activities on the same land. This approach offers an innovative and sustainable solution for clean energy production without compromising food production. To do this, it will be necessary to make a complete analysis of the local context, description of technical and economic feasibility, as well as conclusions on the implementation of these models in the country's rural properties, available technologies and according to the characteristics of the territory and guaranteeing the possible operation of these plants.

In addition, there is evidence of the need to use renewable sources such as solar energy, but maintaining a balance with the productivity of agricultural land, so as not to generate a confrontation between the destination of the soils for energy generation or for agricultural use.

Keywords: Solar energy, sustainable agriculture, agrivoltaics, energy transition, sustainability, farms, photovoltaic farms.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

11

Introducción

El estudio se enfoca en la integración de plantas solares agrovoltaicas como una solución innovadora para abordar la creciente demanda de energía limpia y la necesidad de preservar la actividad agrícola en Colombia. En la actualidad, los propietarios de predios rurales se enfrentan al dilema de elegir entre cultivos agrícolas o la instalación de plantas solares, lo que plantea desafíos en términos de sostenibilidad y seguridad energética. La combinación de ambas actividades en un mismo terreno ofrece una oportunidad única para optimizar el uso del suelo y promover la coexistencia exitosa entre la producción de alimentos y energía.

El contexto actual de Colombia en la transición energética resalta la urgencia de diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Con una ubicación geográfica privilegiada para el aprovechamiento de la energía solar, el país está en una posición ideal para liderar iniciativas de energía renovable. Sin embargo, es crucial que estas iniciativas se desarrollen de manera que no comprometan otros sectores vitales, como la agricultura, que es esencial para la economía y la seguridad alimentaria del país.

Las plantas agrovoltaicas son instalaciones que combinan la producción de energía solar con la agricultura en el mismo terreno. Su funcionamiento se basa en la colocación de paneles solares elevados o con una mayor separación entre mesas de paneles, permitiendo que debajo o entre las mesas se puedan cultivar diferentes tipos de plantas. Esta configuración no solo permite la generación de electricidad, sino que también proporciona sombra a los cultivos, lo que puede reducir el estrés hídrico y mejorar el rendimiento agrícola en ciertas condiciones climáticas.

Entre los beneficios de las plantas agrovoltaicas se destacan la optimización del uso del suelo, la generación de energía limpia, la reducción de la competencia entre tierra agrícola y proyectos energéticos, y el potencial aumento de la rentabilidad para los agricultores. Además, estas plantas pueden contribuir a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover prácticas agrícolas sostenibles.

Los objetivos de este proyecto son identificar el potencial de implementación de plantas solares agrovoltaicas, evaluar su viabilidad técnica y económica, entendiendo el contexto histórico y actual del territorio, y de esta forma concluir sobre la posibilidad de realizar modelos que

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

12

permitan la implementación de plantas agrovoltaicas en predios rurales seleccionados dentro del territorio colombiano. Por tanto, se obtiene un panorama claro que permite identificar los puntos a fortalecer para desarrollar plantas solares agrovoltaicas, que ayuden con el desarrollo del país desde el punto de vista energético y a su vez dinamizando el uso del suelo, particularmente para fomentar la agricultura en los mismos terrenos destinados para uso de generación de energía fotovoltaica.

1 planteamiento del problema

En Colombia, la necesidad de una transición energética hacia fuentes más limpias y sostenibles se ha vuelto una prioridad. Sin embargo, en muchas ocasiones encontrar lugares óptimos para el desarrollo de proyectos energéticos, como plantas solares fotovoltaicas, ha sido un desafío.

Encontrar terrenos con las características topográficas y técnicas necesarias, que no generen un sobre costo en la parte constructiva y operativa de las plantas es difícil, y los que cumplen con estas especificaciones en muchas ocasiones están destinados al uso agrícola. Allí, nace la discusión para los dueños de los terrenos, si optar por la instalación de plantas solares para la generación de energía o continuar con la producción agrícola tradicional.

Actualmente no se tienen modelos integrados que permitan la coexistencia eficiente de la producción agrícola y la generación de energía solar. Sin una solución que combine ambas actividades, los beneficios potenciales de un uso dual del suelo no se están aprovechando adecuadamente, lo que limita las oportunidades de desarrollo sostenible en las áreas rurales del país.

Por otro lado, la implementación de plantas solares agrovoltaicas presenta varios desafíos técnicos y económicos. Es necesario evaluar la viabilidad técnica de estas instalaciones en diferentes regiones del país, considerando las condiciones climáticas, sociales y ambientales. Además, se requiere un análisis económico detallado para determinar la rentabilidad de estos proyectos y su impacto a largo plazo en la economía rural.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

2 justificación

La implementación de granjas solares agrovoltaicas en Colombia nace por diversas razones, como el afán para que el país logre una transición energética segura y sostenible. La dependencia de combustibles fósiles y las limitaciones en la infraestructura energética actual hacen indispensable buscar alternativas sostenibles para la producción de energía que a su vez promuevan la sostenibilidad ambiental. Además, la optimización del uso del suelo en las áreas rurales del país es crucial, ya que destinar el suelo para uso de producción energética muchas veces es visto como un riesgo a la producción de alimentos. Sin embargo, el sistema agrovoltaico permite dinamizar el uso de los terrenos y generar mayor diversificación de ingresos a los agricultores por el arrendamiento de los predios, reduciendo su dependencia de las cosechas y además generando nuevas fuentes de empleo y desarrollo económico local.

Una justificación fuerte para este trabajo es la significativa disminución de emisiones de CO₂ que las plantas fotovoltaicas pueden lograr. En un contexto global donde el cambio climático representa una amenaza creciente, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es crucial. Las plantas solares agrovoltaicas no solo proporcionan una fuente de energía limpia, sino que también contribuyen a la reducción de la huella de carbono de la nación. Al sustituir los combustibles fósiles por energía solar, se disminuye considerablemente la emisión de CO₂, lo que ayuda a mitigar el calentamiento global y promueve un medio ambiente más saludable.

La coexistencia segura de la producción agrícola y energética también puede contribuir a la seguridad alimentaria, un aspecto fundamental en un mundo donde el cambio climático y otros factores amenazan la producción de alimentos. Este sistema ofrece una solución holística, donde la generación de energía limpia y la agricultura pueden prosperar simultáneamente, beneficiando tanto al medio ambiente como a la economía local.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

14

3 objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad y los beneficios de la implementación de plantas solares agrovoltaicas como una solución integrada para la producción de energía y alimentos en Colombia.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis del contexto local y los antecedentes relacionados con la transición energética y la agricultura sostenible en Colombia, durante los últimos 5 años.
- Describir la viabilidad técnica de la implementación de plantas solares agrovoltaicas en predios rurales seleccionados en Colombia.
- Analizar el impacto económico y ambiental de la integración de sistemas agrovoltaicos en la producción agrícola, dentro del territorio colombiano.

4 Marco teórico

La incertidumbre del cambio climático y la necesidad de encontrar un equilibrio con el medio ambiente han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles en el ámbito energético. En los últimos años y con la llegada de las plantas solares fotovoltaicas, se evidencia la necesidad de integrar estas granjas solares con la agricultura, prometiendo beneficios tanto para la producción de alimentos como para la generación de energías limpias.

En ese sentido, se deben buscar soluciones que permitan reducir el impacto económico, ambiental y social de la producción energía y agrícola. Para ello es posible proponer la creación de sistemas integrados que combinen la generación de electricidad mediante energía solar y la producción agrícola en un mismo campo, lo que ofrece beneficios económicos y ambientales y

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

sociales significativos, convirtiendo los sistemas agrícolas y fotovoltaicos en granjas agrovoltaicas. (Baydyk et al., 2022).

Por otro lado, en el contexto colombiano es necesario abordar específicamente la situación del país en términos de agricultura y energía renovable. Para ello, se debe reemplazar las fuentes de energía convencionales por fuentes renovables y dado el alto potencial solar del país y la necesidad de reducir los costos de producción agrícola se puede hacer uso compartido de la tierra para la agricultura y la generación de energía solar, en las mismas extensiones de territorio. (Cusva, 2022).

De acuerdo con esto, es importante tomar como ejemplo diferentes países en el mundo que han realizado estudios sobre el tema o desarrollado este sistema, uno de ellos es Chile, donde se aborda la importancia de los sistemas agrovoltaicos (APV) como solución energética sostenible al fusionar la generación de energía fotovoltaica con el desarrollo agrícola, destacando su potencial para reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el cambio climático. mostrando que el proyecto es viable y rentable, subrayando el papel clave de los APV en la promoción del desarrollo sostenible y la eficiencia energética en áreas agrícolas. (Latorre et al., 2023).

Países como Alemania, también han abordado el tema, destacando la importancia de los sistemas agrovoltaicos. Se resalta cómo estos sistemas ofrecen una serie de ventajas, incluyendo su potencial de desarrollo y su carácter limpio y reciclable. Sin embargo, también señala una brecha significativa entre el potencial teórico y su aplicación práctica. Esto subraya la necesidad de una evaluación exhaustiva de la eficiencia y los beneficios económicos y ambientales de los sistemas agrovoltaicos. Además, se destaca la importancia de considerar la competencia y cooperación entre la generación de energía fotovoltaica y la producción agrícola para lograr una integración efectiva de ambos sectores, lo cual es esencial para terminar con el debate que se ve particularmente en Colombia para los dueños de los terrenos, entre la decisión de un proyecto solar o la agricultura. (Chalgynbayeva et al., 2022).

De este modo, se debe destacar el papel crucial de los sistemas agrovoltaicos en la lucha contra el cambio climático. Estos sistemas combinan la producción agrícola con la generación de

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

energía solar fotovoltaica y ofrecen una solución integral para aumentar la rentabilidad de las explotaciones agrícolas y proteger los cultivos contra eventos climáticos adversos. A pesar de su potencial, aún son relativamente desconocidos, pero su implementación se presenta como una necesidad urgente en el contexto global de mitigación del cambio climático. Estos sistemas no solo ayudan a reducir los efectos del cambio climático, sino que también promueven el equilibrio entre la agricultura y la generación de energía (Marcuta et al., 2023)

Si bien, estas plantas muestran diferentes beneficios, también se debe pensar en los retos ingenieriles que traen para su ejecución, retos desde el diseño y su estructura, como la producción de cultivos acordes y viables para estos sistemas, además de las regulaciones políticas que se puedan tener, desde el ámbito energético y agricultor, en ese sentido, se hace muy importante dar un enfoque más práctico a la hora de abordar el tema, entendiendo la importancia de la colaboración entre diferentes actores y la adaptación de los sistemas a las condiciones locales, con el fin de dar el mayor rendimiento de cada parte para el buen funcionamiento de esta tecnología en pro del crecimiento social en la generación energética y agrícola.

Del mismo modo, se puede destacar el papel fundamental de la política y la regulación, en la promoción de los sistemas agrovoltaicos, examinando las diferentes acciones que pueden promover la implementación de sistemas agrovoltaicos a nivel nacional, mostrando la importancia de incentivos financieros y la integración de estos sistemas en marcos de políticas existentes. (Carrause & Sartre, 2023)

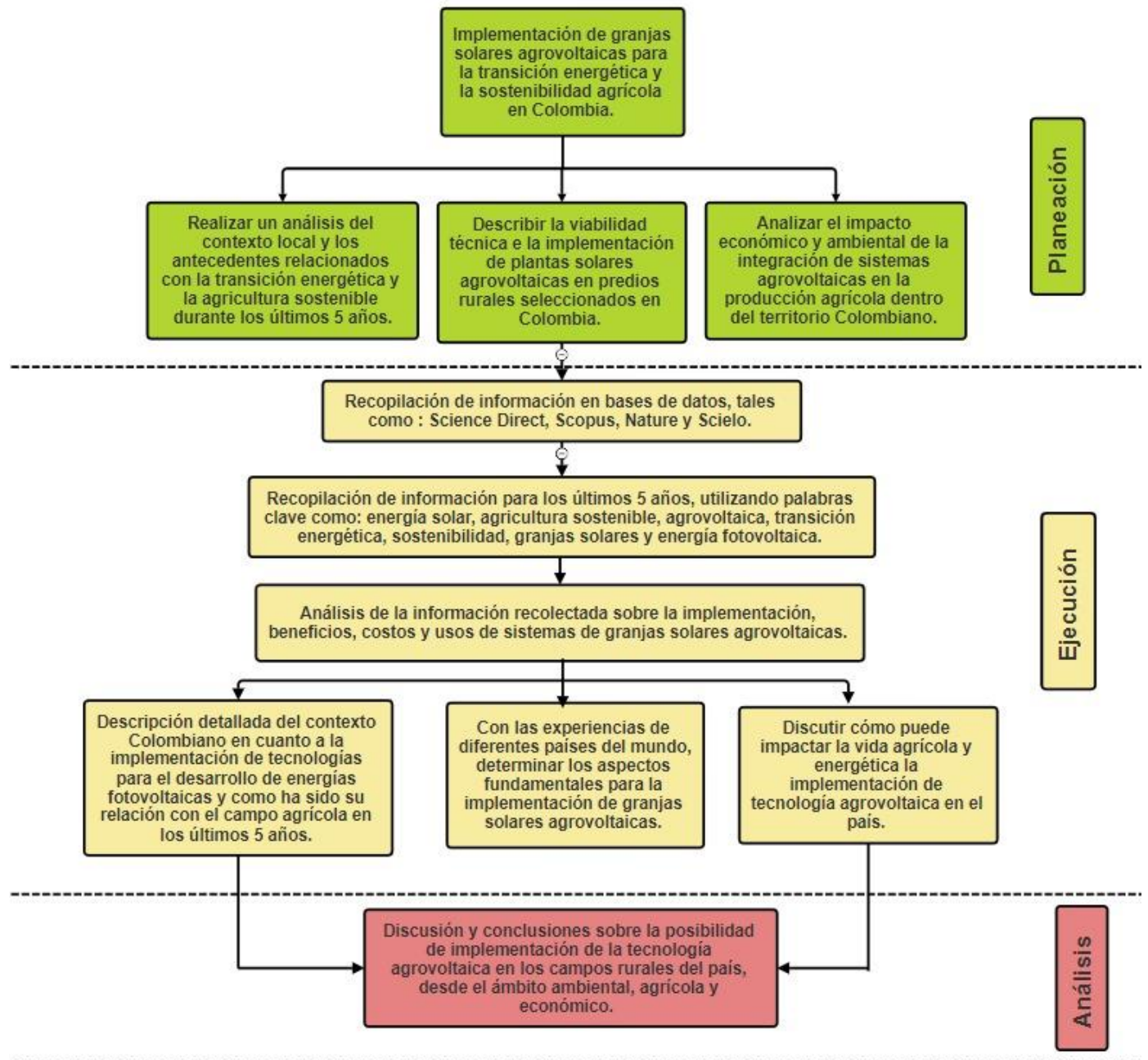
Por lo tanto, la integración de la energía solar y la agricultura ofrece una serie de beneficios potenciales, incluida la reducción de los costos de producción agrícola, la generación de energía limpia y la mitigación del cambio climático. Sin embargo, aún existen desafíos técnicos, económicos y políticos que deben abordarse para promover la adopción generalizada de estos sistemas. Se requiere una mayor investigación y colaboración entre diferentes actores para desarrollar soluciones efectivas y sostenibles que puedan contribuir al desarrollo agrícola y energético sostenible en Colombia.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

17

5 Metodología

Figura 1
Metodología



Nota. Descripción general de la metodología utilizada.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

5.1 Algoritmo de Búsqueda

Para la realización de este trabajo y poder determinar es estado actual de la viabilidad de desarrollar sistemas agrovoltaicos en Colombia y el contexto en los últimos 5 años, se siguieron diferentes pasos para la búsqueda de información:

Selección de Bases de Datos: Se utilizaron las bases de datos académicas disponibles a través de la Universidad de Antioquia, tales como Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Scielo, entre otras.

Palabras Claves Utilizadas: Se definieron una serie de palabras claves y frases relevantes para la búsqueda de información. Estas fueron elegidas para cubrir diferentes aspectos del tema de investigación, algunas de estas fueron: Sistemas agrovoltaico, agrovoltaicos en Colombia, energía solar en agricultura, viabilidad agrovoltaica, energía renovable en agricultura, desarrollo sostenible en agricultura, Energía solar, transición energética y granjas fotovoltaicas.

Filtros de Búsqueda: Se aplicaron filtros para limitar los resultados a publicaciones recientes (últimos 5 años), artículos en inglés y español.

Revisión de Resultados: Se revisaron los títulos y resúmenes de los artículos obtenidos para seleccionar aquellos que eran más relevantes para el tema de investigación y de esta manera escoger los mas aportantes al tema de investigación.

El proceso de búsqueda y selección de artículos permitió construir una base sólida de información para evaluar la viabilidad de desarrollar sistemas agrovoltaicos en Colombia. La metodología aplicada asegura una cobertura amplia y relevante del tema, facilitando la elaboración de un análisis exhaustivo y bien fundamentado, además se escogieron más de 10 artículos de estas bases de datos, con los cuales se logro dar un fundamento teórico importante al trabajo realizado.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

6 Resultados

6.1 Revisión general.

Los sistemas agrovoltaicos en el mundo sigue siendo una tecnología de generación de energía relativamente nueva, requiere de mayores desarrollos tecnológicos para perfeccionar de mejor manera su utilización y lograr un 100% de rendimiento en cuanto a generación de energía y uso agrícola. Además, en Colombia la implementación de políticas gubernamentales que unifiquen la generación de energía y la agricultura es casi nula, mostrando el desconocimiento y falta de interés en muchos aspectos por el desarrollo de estos nuevos proyectos.

Sin embargo, no solo Colombia vive este panorama, en Francia un estudio revela que, a nivel nacional, el control a distancia por parte del Estado no proporciona un marco de gobernanza capaz de implicar a los distintos actores en los ámbitos de la agricultura y la energía. (Carrause & Sartre, 2023). Mostrando que la falta de políticas relacionadas para la generación de energía y la agricultura es una desventaja en diferentes regiones del mundo.

La falta de políticas centradas en la relación energía y agricultura, no se fundamenta en más que el desconocimiento de las ventajas que pueden traer los sistemas agrovoltaicos para la generación de energía y los agricultores. En Alemania un sistema piloto monitoreado por Fraunhofer Institute For Solar Energy Systems (ISE) (Chalgynbayeva et al., 2022), evidencia el concepto de la agrovoltaica y como se incrementa la productividad general con estos sistemas (Imagen 2).

Utilizando el concepto (LER) Land Equivalent Ratio (Dupraz C et al., 2011), se puede determinar numéricamente si la productividad de la generación de energía en conjunto con la agricultura en la misma área de tierra es más rentable o no. (ecuación 1).

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

Ecuación 1

Valor LER

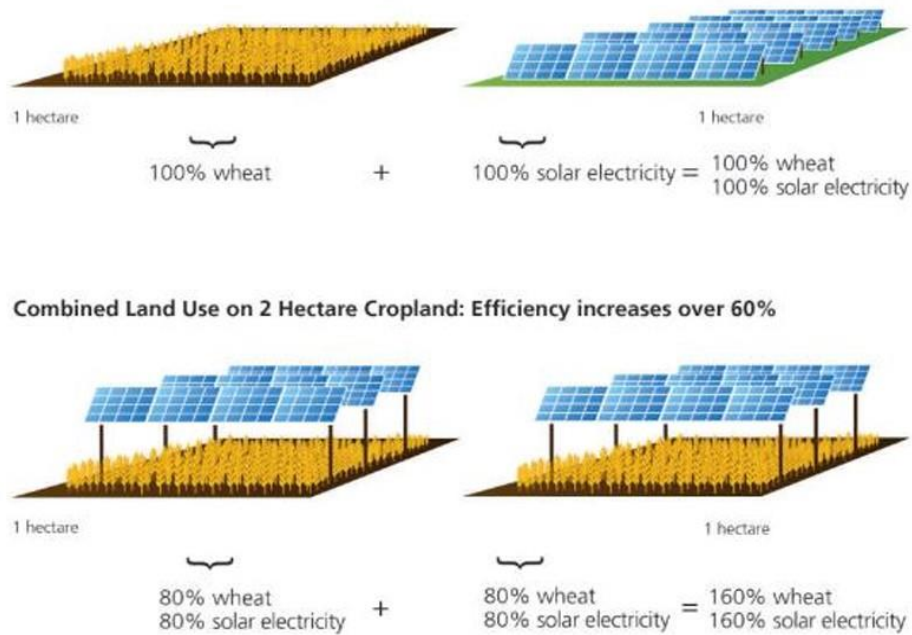
$$\text{LER} = (\text{Rendimiento cultivo con paneles} / \text{Rendimiento cultivo sin paneles}) + (\text{Rendimiento eléctrico APV} / \text{Rendimiento eléctrico PV})$$

Nota. Ecuación general del valor LER para determinar el potencial de implementación de un sistema agrovoltaico. Tomada de (Cusva,2022).

En ese sentido, si el valor LER es mayor a uno (1.0) el uso combinado del suelo es mas efectivo que implementar cultivos y arreglos fotovoltaicos separados para la misma área de terreno.

Figura 2

Concepto de agrovoltaica



Nota. Concepto y comparación de la eficiencia en la aplicación de los sistemas agrovoltaicos. Tomada de (Cusva,2022).

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

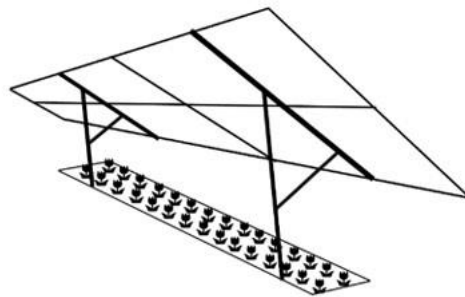
6.2 Opciones de agrovoltaicos.

Los Agrovoltaicos con cultivos se pueden desarrollar de diferentes formas de acuerdo con la particularidad climática de cada cultivo y ubicación de la planta solar. En ese sentido, una de las opciones más utilizadas es la plantación agrícola bajo mesas con paneles fotovoltaicos. Este tipo de sistema esta limitado a cierto tipo de cultivos debido a la baja intensidad de luz solar que alcanza a llegar debajo de las mesas. Sin embargo, existen diferentes productos agrícolas que permiten la funcionalidad de este sistema, aun bajo estas condiciones; Cultivos como lechuga, batatas, berenjenas, soya, yuca, se adaptan a condiciones de sombra o baja luz solar y los hacen óptimos para estos proyectos (Katsikogiannis et al. 2022).

En Tailandia exploraron el uso del suelo bajo paneles fotovoltaicos construyendo un estanque, plantando chiles y pasto, y monitoreando diversos factores como la intensidad de la luz solar, la temperatura del aire, la temperatura de los paneles fotovoltaicos, la corriente eléctrica y el voltaje (Kumpanalaisatit et al. 2019). Sus hallazgos indicaron que el estanque y las plantas de chile facilitaron una generación eléctrica óptima, alcanzando hasta 1.6 kW. Este resultado sugiere que la plantación bajo paneles fotovoltaicos en sistemas PV fijos, incluso sin planificación agrícola previa, tiene el potencial de producir resultados satisfactorios.

Figura 3

Cultivos bajo mesas con paneles



Nota. Descripción grafica de los cultivos bajo la mesa de paneles solares. Tomada de (Cusva,2022).

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

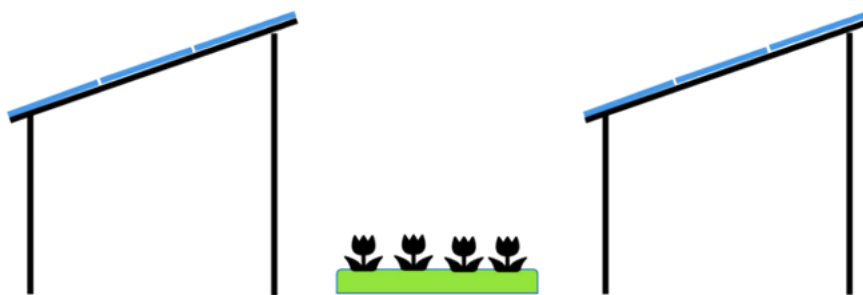
22

Por otro lado, existe otra opción para desarrollar un proyecto agrovoltaico ubicando los cultivos entre las mesas de paneles. Este tipo de configuración necesitaría mayor extensión de terreno que el anterior, pues la plantación ya no se estaría llevando a cabo debajo de las mesas. Un agrovoltaico de este tipo permite mantener una altura de la estructura metálica mucho más baja y así ahorrar costos en términos constructivos. Además, abre más el panorama debido a que podría funcionar para mayor cantidad de cultivos que sí se desarrollan bajo las mesas, manteniendo las condiciones naturales de los cultivos en cuanto a luz solar, y favoreciendo a aquellos productos agrícolas que por su naturaleza requieren de exposición constante al sol para una producción del 100%.

(Malu et al. 2017) En la India estudiaron la efectividad de los paneles fotovoltaicos y su viabilidad en la producción de uvas utilizando esta configuración. En comparación con la agricultura convencional de uvas, el valor económico de los viñedos equipados con paneles fotovoltaicos aumentó por un factor de más de 15. Además, si las granjas de uvas a nivel nacional tuvieran sistemas fotovoltaicos, se podrían generar hasta 16,000 GWh de electricidad suficiente para satisfacer la demanda eléctrica de una población de más de 15 millones de personas.

Figura 4

Cultivos entre mesas



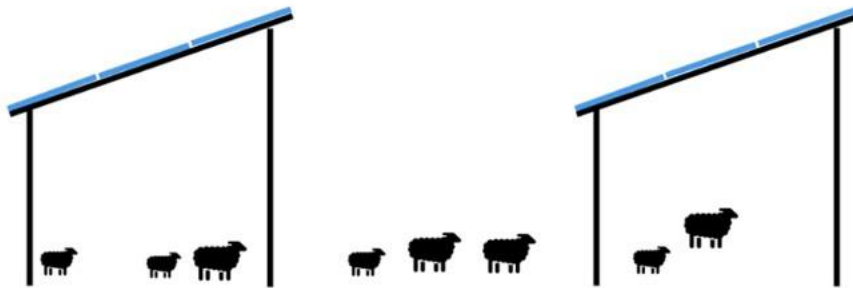
Nota. Descripción gráfica de los cultivos entre las mesas de paneles solares. Tomada de (Cusva,2022).

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

Los sistemas Agrovoltaicos en el mundo no son solo constituidos por una coexistencia entre cultivo y paneles solares. Existe otra alternativa como la convivencia en la misma extensión de terreno de paneles solares y animales. En Colombia existen empresas dedicadas a la generación de energía solar que ya están empezando a implementar esta idea, utilizando en sus plantas animales como los camuros, permitiendo el pastoreo dentro de los predios donde se ubican las plantas solares, y a su vez, ahorrando costos anuales en cuanto a labores de poda en los predios.

Figura 5

Agrovoltaicos con animales.



Nota. Descripción grafica de los sistemas agrovoltaicos con animales. Tomada de (Cusva,2022).

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

6.3 Contexto general agrícola y eléctrico en Colombia.

Particularmente, Colombia es uno de los países con mayor diversidad biológica del mundo. Es uno de los mayores productores de café, aceite de palma, caña de azúcar, aguacate, plátano, piña, cacao, mostrando el potencial agrícola del país. De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística, a finales del año 2020 el sector agrícola representó un valor agregado de 7,696 mil millones de pesos con respecto al PIB, el sector agropecuario creció 6.8%, 0.1% y 1.5% en el primer, segundo, y tercer trimestre del año respectivamente (Cusva, 2022). La Encuesta Nacional Agropecuaria ENA (DANE, 2019) indicó que para el año 2019, en total el uso del suelo fue de 50 millones de hectáreas donde el 9.2% corresponde al sector agrícola.

Figura 6

DANE, Encuesta Nacional Agropecuaria, 2019



Nota. Comparativa de las cosechas en hectáreas para los principales cultivos en Colombia. Tomada de (DANE, 2019)

Hoy en día uno de los principales retos del país es incrementar la productividad del campo, puesto que existen zonas rurales con deficiencias en materia de bienes públicos como vías rurales, centros de acopio y prestación de servicios públicos como la electricidad. Sin embargo, la transformación hacia una agricultura sostenible y resiliente es una necesidad que requiere de la suma de esfuerzos, la generación de alianzas y el desarrollo positivo. Esto con el fin de que el sector rural esté en la capacidad de responder a la intensificación sostenible de su producción.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

25

Desde el sector energético, Colombia depende en gran medida de la energía hidráulica. Durante el mes de febrero de 2021 la generación promedio del Sistema Interconectado Nacional fue de 202.03 GWh-día donde el 25.39% es no renovable (combustible fósil), mientras que la generación renovable (146.69 GWh-día) representó el 74.61%, la cual está dominada por la generación hidráulica con un 97.66%, seguida de la biomasa (1.58%), eólica 0.13%) y finalmente, la solar , representando solamente un 0.64% (Boletín Energético, 2019).

El servicio eléctrico no se encuentra disponible en todo el país. El Sistema Interconectado Nacional abarca aproximadamente un 34% del territorio nacional. En este, se encuentra el 96% de la población con una cobertura del 95.54%. A nivel urbano y rural, se cuenta con una cobertura del servicio eléctrico del 99.35% y 83.39% respectivamente, de acuerdo con el Plan Indicativo de Expansión de la Cobertura Eléctrica (PIEC), elaborado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), el objetivo es expandir 100% la cobertura eléctrica de todos los municipios del país, a partir de la combinación de esfuerzos interinstitucionales e intersectoriales para desarrollar políticas públicas que conlleven a cerrar las brechas territoriales y focalizar el desarrollo local entorno a la energía. (UPME, 2023).

De acuerdo al IDEAM, Colombia presenta valores de irradiación solar global superiores a los 5.5 KWh/m² por día, esto gracias a su vez a su ubicación geográfica, sin embargo, existe un distanciamiento muy grande en cuanto a tecnología de desarrollo solar, donde si bien en departamentos como La Guajira, Atlántico, Bolívar y Magdalena, por sus condiciones topográficas y climáticas, serian óptimos para desarrollos solares agrovoltaicos, aún no se implementan políticas gubernamentales que ayuden con el desarrollo de estos proyecto y se tiene un vacío grande de información e investigaciones tecnológicas relacionadas con dichos proyectos.

6.4 Impacto Ambiental y social.

La implementación de plantas solares agrovoltaicas en los suelos rurales de Colombia puede tener impactos directos en el medio ambiente como la eficiencia en el uso del terreno, donde, se permite un uso dual de este, optimizando el espacio al combinar la producción de energía y

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

alimentos en la misma área. Esto puede reducir la necesidad de convertir nuevos terrenos naturales en áreas agrícolas o para instalaciones de energía solar, ayudando a conservar los ecosistemas naturales (Marcuta et al., 2023).

Por otro lado, La generación de energía solar es una fuente de energía renovable que reduce la dependencia de combustibles fósiles, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), a su vez, estos sistemas pueden proporcionar sombra parcial a los cultivos reduciendo la evaporación del agua del suelo y manteniendo temperaturas del suelo más bajas. Esto puede ser beneficioso en áreas áridas o durante olas de calor, mejorando las condiciones de crecimiento para ciertos cultivos, donde, también esta sombra de los paneles puede proteger el suelo de la erosión causada por el viento y la lluvia intensa. Además, la menor evaporación del agua puede ayudar a mantener la humedad del suelo (Marcuta et al., 2023).

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) contribuyen significativamente al calentamiento global. La agricultura representa aproximadamente el 10%–14% del aumento en las emisiones de GEI, debido principalmente al sector energético y la producción ganadera. La energía solar es una fuente de energía renovable que tiene la capacidad de reducir las emisiones de GEI en la agricultura. Según estimaciones previas, los sistemas fotovoltaicos montados en tierra de 1,500 kW podrían reducir las emisiones de GEI en 1,549 tCO₂e/año. A su vez, la integración de un sistema de generación de energía con la agricultura podría reducir las emisiones de GEI, y la electricidad generada por el sistema agrivoltaico podría utilizarse para abastecer las granjas de producción agrícola, comunidades alejadas de los poblados centralizados o también fomentar las tecnologías de vehículos eléctricos en zonas rurales, sirviendo como fuentes de carga en estos lugares más alejados (Kumpanalaisatit et al., 2022).

Socialmente, los sistemas agrovoltaicos tienen implicaciones positivas para la comunidad en general, ayudando en el desarrollo de los diferentes sectores agrícolas, tanto a los propietarios de los predios como a los trabajadores, generando diversas fuentes de empleo y permitiendo a futuro que las personas implicadas crezcan y favorezcan al sector eléctrico y agricultor en general.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

A su vez se logra trabajar conjuntamente la coexistencia entre estos dos sectores y así mitigar los futuros conflictos de uso de la tierra entre la agricultura y la energía. (Kumpanalaisatit et al., 2022).

7 Discusión

A pesar de que existen países con un mayor desarrollo en la implementación de plantas solares agrovoltaicas, persisten numerosos vacíos tecnológicos y operativos que deben ser abordados y mejorados. Colombia, gracias a su ubicación geográfica privilegiada, tiene un potencial significativo para el desarrollo de estos proyectos. No obstante, las limitaciones actuales, tanto gubernamentales como sociales, han frenado la implementación de sistemas agrovoltaicos en el país.

El principal obstáculo radica en la falta de un enfoque gubernamental robusto hacia el desarrollo de energías renovables. La situación social y política del país también juega un papel crucial, ya que la inestabilidad y la falta de políticas claras y continuas desincentivan la inversión en proyectos de largo plazo como los agrovoltaicos. Sin embargo, un enfoque integrado que combine seguridad alimentaria y energética podría ser la clave para el futuro de Colombia en este sector.

Es fundamental aprender de las experiencias de otros países que ya han incursionado en este campo. La cooperación internacional y la adaptación de tecnologías exitosas a las condiciones locales pueden ofrecer soluciones innovadoras que aborden tanto la demanda creciente de energía limpia como la preservación y optimización de la actividad agrícola. Este enfoque puede resolver el dilema que enfrentan muchos propietarios de tierras rurales entre mantener la producción agrícola tradicional o utilizar sus tierras para la instalación de plantas solares. La integración de ambas actividades en un mismo terreno representa una oportunidad única para maximizar el uso del suelo, beneficiando tanto la producción de alimentos como la generación de energía.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

La selección de la configuración adecuada del sistema agrovoltaico es crucial. Es necesario escoger los tipos de cultivos adecuados para cada región del país y determinar la mejor ubicación de estos dentro de la planta solar. Para lograr esto, es imprescindible que el gobierno desarrolle marcos regulatorios adecuados y ofrezca incentivos económicos que fomenten la adopción de sistemas agrovoltaicos. Sin estos apoyos, será difícil superar las barreras iniciales que enfrentan los proyectos de energías renovables en el país.

El contexto agrícola y energético de Colombia, con su alta biodiversidad y su dependencia de la energía hidráulica, proporciona un entorno favorable para la adopción de sistemas agrovoltaicos. Sin embargo, la falta de tecnología adecuada y políticas de apoyo subraya la necesidad de un enfoque integrado y coordinado. La investigación y el desarrollo continuo de tecnologías adaptadas a las condiciones locales son esenciales para el éxito de estos sistemas.

Los estudios revisados demuestran los beneficios ambientales, económicos y sociales de los proyectos agrovoltaicos. Aunque es cierto que aún falta mucho por avanzar en este campo, estos proyectos representan un puente hacia la seguridad energética mediante fuentes renovables, al mismo tiempo que aseguran la seguridad alimentaria de los colombianos. La combinación del uso de suelos rurales para la producción de alimentos y la generación de energía es una estrategia que puede transformar el sector agrícola y energético del país, ofreciendo un modelo sostenible y resiliente para el futuro.

8 Conclusiones

La integración de sistemas agrovoltaicos en terrenos rurales de Colombia representa una estrategia eficaz para optimizar el uso del suelo. Este enfoque permite la coexistencia de la producción agrícola y la generación de energía solar en la misma parcela, maximizando la eficiencia del terreno disponible. En un país como Colombia, donde la competencia por el uso del suelo es alta; El desconocimiento, seguridad y falta de impulso gubernamental hacia nuevos desarrollos, hace que la disponibilidad de tierras adecuadas para proyectos solares y agrícolas sea limitada. La implementación de agrovoltaicos puede ofrecer una solución viable para superar este

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

desafío. La tecnología agrovoltaica permite aprovechar espacios rurales de manera dual, lo cual es fundamental para aumentar la productividad y promover la sostenibilidad en el uso de recursos naturales.

Técnicamente los sistemas agrovoltaicos en Colombia dependen de varios factores, incluyendo las condiciones climáticas, la topografía del terreno y las necesidades específicas de los cultivos. Algunos cultivos como lechugas, batatas, berenjenas, yuca y soya, que pueden prosperar con menor intensidad de luz solar, son especialmente adecuados para crecer bajo paneles solares. Por otro lado, cultivos que requieren mayor exposición solar pueden beneficiarse de configuraciones donde los paneles solares están dispuestos entre las filas de cultivos. Evaluar la viabilidad técnica incluye un análisis detallado de estos factores para diseñar sistemas agrovoltaicos que maximicen la productividad agrícola y la generación de energía.

En términos económicos, es crucial realizar un análisis de costo-beneficio para determinar la rentabilidad de estos sistemas. La inversión inicial en infraestructura solar puede ser significativa, pero los beneficios a largo plazo, como la reducción en costos de energía y el incremento en la productividad agrícola, pueden compensar estos costos. Además, los sistemas agrovoltaicos pueden proporcionar estabilidad financiera a las comunidades rurales al diversificar las fuentes de ingresos.

El apoyo gubernamental y empresarial se hace fundamental para determinar para cada caso particular cual es la mejor configuración para la construcción de un agrovoltaico, que permita una coexistencia óptima con la energía solar y la agricultura y a su vez traiga desarrollo a las comunidades.

La implementación de estos sistemas tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La energía solar es una fuente renovable que disminuye la dependencia de combustibles fósiles, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. Además, los paneles solares pueden proporcionar sombra a los cultivos, reduciendo la evaporación del agua y manteniendo temperaturas del suelo más bajas. Esto es particularmente beneficioso en regiones áridas o durante olas de calor, mejorando las condiciones de crecimiento para ciertos cultivos y conservando recursos hídricos.

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

Si bien socialmente llevar a cabo estos proyectos tienen un impacto positivo en las comunidades rurales al crear empleos y mejorar la autosuficiencia energética y alimentaria, la capacitación de empleados en nuevas tecnologías y prácticas agrícolas sostenibles puede fomentar el desarrollo de habilidades y generar oportunidades económicas en áreas rurales. Además, estos sistemas pueden ayudar a resolver conflictos de uso de la tierra entre los sectores agrícola y energético, promoviendo una coexistencia armoniosa y sostenible.

A su vez, la adopción de sistemas agrovoltaicos puede transformar las dinámicas sociales y económicas en las zonas rurales de Colombia, ofreciendo una solución integradora que potencia tanto la producción agrícola como la generación de energía. La formación y capacitación de la comunidad son esenciales para asegurar que los beneficios de estos sistemas se maximicen y se sostengan a largo plazo.

9 Recomendaciones

Se deben desarrollar políticas gubernamentales específicas que apoyen la integración de la energía solar y la agricultura proporcionando incentivos financieros a los propietarios de tierras rurales y empresas desarrolladoras para la adopción de sistemas agrovoltaicos.

Es importante implementar programas de capacitación para agricultores y técnicos en el manejo y mantenimiento de sistemas agrovoltaicos. La formación debe incluir aspectos técnicos, operativos y de gestión para asegurar la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos, fomentando la investigación y el desarrollo de tecnologías agrovoltaicas adaptadas a las condiciones climáticas y agrícolas específicas de Colombia y colaborando con instituciones académicas, centros de investigación y el sector privado para innovar y mejorar la eficiencia de estos sistemas.

Todo lo anterior como base fundamental para iniciar proyectos piloto en diferentes regiones del país para evaluar la viabilidad técnica y económica de los sistemas agrovoltaicos. Estos proyectos pueden servir como modelos replicables y proporcionar datos valiosos para futuros

Implementación de granjas Solares agrovoltáicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

desarrollos, donde se haga una evaluación continua de los proyectos agrovoltáicos para medir su impacto económico, social y ambiental directamente en las zonas donde se desarrollan.

Se debe establecer alianzas entre el sector público, el sector privado y las comunidades locales para financiar, desarrollar e implementar proyectos agrovoltáicos. La cooperación puede facilitar la movilización de recursos y la transferencia de conocimientos donde se sensibilice a la comunidad y a los agricultores sobre los beneficios ambientales de los sistemas agrovoltáicos, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la conservación del suelo y la eficiencia en el uso del agua.

Referencias

223, B. E. (21 de 3 de 2021). *seguimiento a variables*.

https://www.xm.com.co/boletinesenergetico/Bolet%C3%ADn_223.pdf

Baydyk, T., Mammadova, M. H., & Kussul, E. (2022). Evaluación del impacto de la combinación de cultivos con concentradores solares en su productividad . *Problems of Information Society*, 11-18.

Carrausse, R., & Arnauld de Sartre, X. (2023). ¿El agrivoltaísmo reconcilia la energía y la agricultura? Lecciones de un estudio de caso francés. *Energía, sostenibilidad y sociedad*.

Chalgybayeva, A., Mizik, T., & Bai, A. (2022). Análisis Costo-Beneficio del Parque Solar Fotovoltaico Kaposvár considerando sistemas agrovoltáicos. *Clean Technologies*.

Cusva García, A. C. (2022). Análisis para determinar la viabilidad y potencialidad de sistemas agrofotovoltaicos en zonas agricultoras de Colombia . *Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad de Los Andes* .

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

32

- Dupraz C, Marrou H, Talbot G, Dufour L, Nogier A, Ferard Y. . (2011). *Sciencedirect*.
Renewble Energy Journal 36, 2011.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/cdc77f59-e063-47f6-a708-bcc515d75d84/content>
- Estadística, D. A. (2019). *DANE*. www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena
- Latorre Rodríguez, P., Amig, L., Gatica, G. G., Águila, G., Vidal-Pacheco, L., & Coronado-Hernández, J. R. (2023). Diseño y estudio de factibilidad para la evaluación de un sistema de generación Agrovoltaica: Caso de Temuco en Chile. *Procedia Ciencias de la Computación* .
- M. Kumpanalaisatit, A. J. (24 de 12 de 2019). *Semantic Scholar*. The effect of space utilization under the ground-mounted solar farm on power generation.
<https://www.semanticscholar.org/paper/The-effect-of-space-utilization-under-the-solar-on-Kumpanalaisatit-Jankasorn/643fcc2c77b9a9b5f26eb760b61abc62ce44b778>
- Manoch Kumpanalaisatita, W. S. (2022). *Sciencedirect*. Current Status of Agrivoltaic Systems and Their Benefits to Energy, Food.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352550922002196?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=8899d21a4e73da33
- MARCUTA, L., TINDECHE, C., & Nuta, A. C. (2023). Estudio sobre la importancia del uso de sistemas agrovoltaicos para reducir los efectos del cambio climático . *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development* .
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2021, 05 de Agosto). MinVivienda.
<https://www.minvivienda.gov.co/node/1377>
- Odysseas Alexandros Katsikogiannis, Hesam Ziar, Olindo Isabella. (2022). *Integration of bifacial photovoltaics in agrivoltaic systems: A synergistic design approach*. *Sciencedirect*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921016986>
- Prannay R. Malu a, U. S. (2017). *Sciencedirect*. Agrivoltaic potential on grape farms in India.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138817302096>

Implementación de granjas Solares agrovoltaicas para la transición energética y la sostenibilidad agrícola en Colombia

UPME, M. d. (07 de 2023). *Plan Indicativo de Expansion de Cobertura de Energia Electrica.*

[//www1.upme.gov.co/siel/PIEC/2019-23/PIEC_2019-2023_VF.pdf](http://www1.upme.gov.co/siel/PIEC/2019-23/PIEC_2019-2023_VF.pdf)