

Parques agro voltaicos una alternativa sustentable para mitigar el cambio climático

AGROVOLTAIC PARKS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE TO MITIGATE CLIMATE CHANGE

Recibido:21-06-2024

Aceptación:30-09-2024

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13995954>

Resumen

El presente artículo examina y documenta el potencial de aprovechamiento de la energía derivada de fenómenos naturales como una vía fundamental para abordar la crisis energética y el cambio climático. Mediante una revisión documental, se analizan las tecnologías existentes y emergentes en la captura y conversión de energía solar, así como innovaciones en la generación de energía. Este estudio destaca la importancia de la eficiencia energética, la innovación tecnológica, y la sostenibilidad ambiental en el desarrollo de soluciones energéticas renovables como los sistemas agro voltaicos. Discutiendo como estas tecnologías no solo ofrecen alternativas sostenibles para satisfacer la demanda energética global, sino que también promueven la conservación del medio ambiente y la reducción de la dependencia de fuentes de energía fósiles. El análisis concluye subrayando el rol crítico de la investigación y el desarrollo tecnológico en la optimización de estas fuentes de energía y en la transición hacia un futuro energético más sostenible y resiliente.

Palabras Claves: Conversión fotovoltaica; Eficiencia energética; Innovación Tecnológica; Sostenibilidad Ambiental; Tecnologías Renovables; Sistemas Agro voltaicos.

**Marcían Adriana García Ávila agradece el apoyo brindado por el CONAHCyT mediante la asignación de una beca de maestría. José Francisco Gómez Aguilar agradece el apoyo brindado por el SNII-CONAHCyT.*

Marcían García
Ávila



<https://orcid.org/0009-0000-2488-833X>

m23ce030@cenidet.tecnm.mx

Daniela Hernández
Castañeda



<https://orcid.org/0009-0005-6538-4679>

daniela.hc@cenidet.tecnm.mx

José F. Gómez
Aguilar



<https://orcid.org/0000-0001-9403-3767>

jose.ga@cenidet.tecnm.mx



Esta obra está bajo una Licencia
Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0
Internacional

Abstract

Key words

**Photovoltaic conversion;
Energy efficiency;
Technological
Innovation;
Environmental
Sustainability;
Renewable Technologies;
Agro voltaic systems.**

This article explores the potential of harnessing energy from natural phenomena as a fundamental approach to addressing the energy crisis and climate change. Through a documentary review, we analyze existing and emerging technologies for the capture and conversion of solar, as well as innovations in generating energy. This study emphasizes the importance of energy efficiency, technological innovation, and environmental sustainability in developing renewable energy solutions such as agrivoltaics systems. Arguing how these technologies not only offer sustainable alternatives to meet global energy demand but also promote environmental conservation and reduce dependence on fossil fuel sources. The analysis concludes by highlighting the critical role of research and technological development in optimizing these energy sources and transitioning towards a more sustainable and resilient energy future.

INTRODUCCIÓN

La dependencia de las sociedades modernas en fuentes de energía no renovables ha exacerbado el cambio climático y generado una crisis energética global. Ante este panorama, los fenómenos naturales emergen como pilares fundamentales para el desarrollo de un sistema energético sostenible. Esto resulta esencial en este mundo cada vez más consciente de la necesidad de un desarrollo sostenible, la búsqueda de fuentes de energía alternativas y limpias se ha convertido en una prioridad fundamental. Los fenómenos naturales, como el sol, el viento, el agua y la tierra, ofrecen un enorme potencial para satisfacer nuestras demandas energéticas de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

En el presente artículo se examinan las metodologías y tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar con el objetivo de identificar las tecnologías existentes y emergentes en el campo del aprovechamiento de la energía de fenómenos naturales como los parques agro voltaicos o agro voltaicos, un concepto innovador que combina la agricultura con la generación de energía solar, al respecto, según Gomes & Crispín (2023) los sistemas agro voltaicos consisten en la combinación de la producción agrícola con la

generación de energía solar fotovoltaica en la misma superficie de terreno, en ese sentido, la instalación de paneles solares sobre cultivos o pastos permite aprovechar la luz solar para generar electricidad, sin interrumpir significativamente la actividad agrícola.

La metodología para el desarrollo del estudio consiste en una revisión documental tipo sistemática que permite contextualizar los estudios dentro de un marco de conocimiento existente, identificar vacíos en la investigación y basar sus propias metodologías en trabajos previos, utilizando Web of Science (WoS) (Clarivate Analytics, y Scopus (Elsevier), también libros de texto publicados por editoriales reconocidas. Para el análisis se consultaron bases de datos de literatura revisada por pares donde se consultaron documentos altamente citados escritos en inglés y publicados hasta la fecha; mientras que en Google académico se ubicaron los estudios en idioma español.

Se consideraron las siguientes categorías: publicación en revista (artículo o revisión) y artículo de congreso, también las métricas de los artículos revisados. Es importante además que, desde el punto de vista metodológico, las revisiones sistemáticas según Tamayo (2011) son estudios exhaustivos que sintetizan la evidencia científica sobre un tema específico, por lo que es una etapa crucial en este proceso, ya que permite identificar y evaluar críticamente considerando algunos aspectos fundamentales tales como pertinencia con el tema, además de dar respuesta a los siguientes objetivos específicos e hipótesis:

Objetivos específicos:

1. Analizar los conceptos y principios fundamentales de los parques agro voltaicos.
2. Describir las diferentes tecnologías y configuraciones de parques agro voltaicos, sus tendencias y perspectivas futuras.
3. Valorar los beneficios económicos, sociales y ambientales de los parques agro voltaicos.

Hipótesis: Los parques agro voltaicos ofrecen beneficios económicos a través de la generación de energía limpia, sociales al promover el desarrollo rural y ambiental al reducir la emisión de gases de efecto invernadero y conservar el suelo. ´

El artículo se dirige especialmente hacia una reflexión sobre el futuro del aprovechamiento de la energía solar, destacando las oportunidades y desafíos que se presentan en este campo. Se enfatizará la importancia de la investigación y el desarrollo continuo para optimizar las tecnologías solares y hacerlas aún más competitivas y accesibles, presentando también ejemplos concretos de proyectos y tecnologías que están transformando la forma en que producimos y consumimos energía. También se discutirán las políticas públicas y los incentivos económicos que están impulsando el crecimiento del sector de las energías renovables en todo el mundo.

ANTECEDENTES

Antecedentes Generales

El cambio climático y la crisis energética global emergen como dos de los desafíos más significativos del siglo XXI, impulsando la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes para la producción de energía. Tradicionalmente, la dependencia de fuentes de energía no renovables ha exacerbado los efectos adversos sobre el medio ambiente, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero y la degradación de ecosistemas naturales (González, 2019). En este contexto, la transición hacia fuentes de energía renovable no solo es deseable sino también necesaria para asegurar un futuro energético sostenible y mitigar los impactos del cambio climático. Los fenómenos naturales ofrecen una alternativa prometedora como fuentes inagotables de energía. La radiación solar, es un ejemplo de la diversidad de fuentes que pueden ser aprovechadas para la generación de energía renovable. Este cambio de paradigma hacia el aprovechamiento de fuentes energéticas más limpias y sostenibles no solo tiene el potencial de satisfacer la creciente demanda energética mundial sino también de hacerlo de manera que reduzca significativamente el impacto ambiental asociado a la producción de energía (Sánchez, 2021).

Particularmente en México se cuenta con una reciente historia hacia emprendimientos en materia de energía sustentable. Al respecto, Del Cerro & Caballero (2022) presentan un panorama inspirador de cómo la innovación y el compromiso con la sostenibilidad pueden converger para generar un impacto positivo en el medio ambiente y la sociedad mexicana en

el caso de 10 empresas que han logrado integrar la sostenibilidad en su modelo de negocio. Entre estas empresas se encuentran Ecolana, Ejido Verde, Gricha, Inventive Power, Lluvia Sólida, Pellet México, Playa Viva, Rayito de Luna, Sistema.bio y SmartFish. Cada una de estas empresas ha desarrollado soluciones innovadoras para abordar problemas ambientales y sociales específicos, por supuesto, los proyectos agrovoltaicos también han comenzado a emerger en el marco de la sustentabilidad.

Antecedentes Específicos

Desde el punto de vista académico, se encuentran algunas referencias de estudios realizados sobre el tema de los sistemas agro voltaicos como el de Sanju et al. (2023) quienes evaluaron la aplicación de los mismos en India como mecanismo de mitigación de los impactos sociales y ambientales de los grandes parques solares. La metodología consistió en revisión de literatura sobre el tema, análisis de casos y valoración del aspecto económico. En cuanto a los resultados, se destaca que la agrovoltaica puede mejorar los ingresos de los agricultores y las comunidades locales mediante la integración de actividades agrícolas con la generación de energía solar, también se puede extender la vida útil de los parques solares y reducir el costo nivelado de la energía (LCOE), concluyendo que es una alternativa viable a los parques solares convencionales que ofrece beneficios ambientales, sociales y económicos.

Guerrero (2023) cuyo objetivo fue evaluar la factibilidad de implementarlos para el cultivo de cacao en Cabuyaro (Colombia), considerando tanto su viabilidad técnica como económica. La metodología consistió en un diseño conceptual del sistema agro voltaico adaptado a las condiciones climáticas y agronómicas de Cabuyaro, teniendo en cuenta las necesidades del cultivo de cacao y las características técnicas del municipio, a partir de la simulación de escenarios. Los resultados indicaron que es factible tanto técnica como económicamente concluyendo para el cultivo de cacao en la región de Cabuyaro presentando además una perspectiva positiva sobre su utilidad.

Por otra parte, Rösch & Fakharizadehshirazi (2024) llevaron a cabo una investigación con el objetivo de evaluar el potencial de la agrovoltaica en Alemania para contribuir a la

transición energética del país hacia el uso exclusivo de energía renovable para el año 2045. En cuanto a la metodología, se desarrolló un Sistema de Información Geográfica (SIG) sociotécnico para analizar el potencial de uso espacial de la tierra para la agrovoltaica considerando restricciones de uso de la tierra y criterios de idoneidad para la implementación de la tecnología. Los resultados del estudio revelaron que la agrovoltaica en cultivos permanentes, moderadamente tolerantes a la sombra y totalmente tolerantes a la sombra, podría alcanzar hasta el 88% del objetivo de energía fotovoltaica de Alemania para el año 2030. Alrededor del 50% del 0,74% del territorio alemán utilizado para estos cultivos tiene una buena calidad del suelo, con una Calificación de Calidad del Suelo superior a 60.

Aproximadamente el 11% de la superficie de cultivo permanente de tamaño pequeño (<2,5 ha) es adecuada para la agrovoltaica debido a la irradiación solar favorable, la orientación y la pendiente. La mayor parte de este potencial (79%) se concentra en las regiones del sur de Alemania.

A nivel nacional se destaca a Vilchis (2020), cuyo objetivo de estudio fue describir el impulso de la electrificación de las localidades rurales en México que carecían de servicio eléctrico en el año 2020. Se realizó un análisis exhaustivo de la situación actual y se evaluaron diferentes modelos alternativos de suministro eléctrico, como las energías híbridas y renovables, en términos de su viabilidad técnica, económica y social para finalmente formular una propuesta de políticas públicas que consideren la implantación de los modelos alternativos de suministro eléctrico más adecuados para cada localidad, ya que son viables técnica, económica y socialmente para electrificar las localidades rurales identificadas.

Mientras que el potencial para el desarrollo de la energía solar en México se ha calificado con una gran perspectiva futura porque el país tiene un abundante recurso solar y un mercado en crecimiento para la energía renovable. Al respecto, Cabrera et al. (2010), considerando factores como la irradiación solar, la disponibilidad de tierra y la infraestructura existente concluye que México tiene un potencial significativo para la generación de energía solar fotovoltaica, con la capacidad de satisfacer una parte importante de la demanda energética del país, mientras que González et al. (2016) analizando las perspectivas en el

contexto de la reforma energética del país estiman que la reforma energética ha creado un entorno favorable para el desarrollo de la energía fotovoltaica, lo que podría impulsar un crecimiento significativo en la instalación de parques fotovoltaicos en los próximos años.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El desarrollo de tecnología de conversión de energía solar a eléctrica, se ha vuelto un tema de importancia a nivel mundial. Las aplicaciones son variadas, desde las más sencillas, como el secado solar de frutas, carne, con deshidratadores solares o las más complejas como lo es la generación de energía eléctrica derivado de los recursos naturales como los parques fotovoltaicos o los sistemas agro voltaicos. Asimismo, el potencial para el desarrollo de la energía solar en México se ha calificado con una gran perspectiva futura porque el país tiene un abundante recurso solar y un mercado en crecimiento para la energía renovable.

Al respecto, Cabrera et al. (2010), considerando factores como la irradiación solar, la disponibilidad de tierra y la infraestructura existente concluye que México tiene un potencial significativo para la generación de energía solar fotovoltaica, con la capacidad de satisfacer una parte importante de la demanda energética del país, mientras que González et al. (2016) analizando las perspectivas en el contexto de la reforma energética del país estiman que la reforma energética ha creado un entorno favorable para el desarrollo de la energía fotovoltaica, lo que podría impulsar un crecimiento significativo en la instalación de este tipo de parques en los próximos años.

En general, los estudios proyectan que la capacidad de generación de energía fotovoltaica en México continúe creciendo en los próximos años, lo que contribuirá a un futuro energético más sostenible para el país. Además de los parques fotovoltaicos a gran escala que se han desarrollado tales como el Parque Solar Puerto Peñasco (Sonora) con una capacidad de 800 MW que se considera el parque solar más grande de Latinoamérica, también se puede mencionar el Parque Solar El Llano (Aguascalientes) con una capacidad de 770 MW y es el segundo parque solar más grande de México, mientras que el Parque Solar Viga Chica (Sonora) con una capacidad de 664 MW, es el tercer parque solar más grande de México.

También se ha iniciado un número creciente de proyectos de energía solar a pequeña escala en México. Estos proyectos, que suelen ser instalados en hogares y empresas, están ayudando a democratizar el acceso a la energía solar y a hacer que la energía renovable sea más asequible para todos, por lo tanto, los parques fotovoltaicos están jugando un papel cada vez más importante en la generación de energía en México. Estos parques ofrecen una serie de beneficios para el país, incluyendo la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, la mejora de la seguridad energética, la creación de empleos y la protección del medio ambiente. Se espera que el desarrollo de la energía solar en México continúe creciendo en los próximos años, lo que contribuirá a un futuro energético más sostenible para el país.

Los Sistemas Agro voltaicos

Los sistemas agro voltaicos, también conocidos como agrivoltaicos, son sistemas que combinan la producción de energía solar con la agricultura, ganadería o apicultura. Estos sistemas se basan en la idea de que los paneles solares pueden proporcionar sombra y protección a los cultivos, animales y panales de abejas mejorando su rendimiento y productividad. La idea de combinar la energía solar fotovoltaica con la producción agrícola, conocida como agro voltaica, surgió por primera vez en 1981. Los investigadores alemanes Goetzberger y Zastrow del Instituto Fraunhofer propusieron un sistema innovador que elevaba la estructura de paneles solares a unos 2 metros del suelo y separaba las hileras de cultivos tres veces la altura de los módulos. Este diseño permitía una distribución uniforme de la luz solar en el suelo, manteniendo el espacio suficiente para el movimiento de maquinaria agrícola tal como puede visualizarse en la figura 1a (Toledo & Scognamiglio, 2021).

Más adelante, explican Toledo & Scognamiglio (2021) que el ingeniero japonés Akira Nagashima dio vida en el año 2004 a este concepto con el desarrollo del primer sistema agro voltaico, denominado "compartimiento solar". Inspirado en las pérgolas de jardín, Nagashima diseñó campos de prueba con diferentes niveles de sombra, basándose en el principio del punto de saturación lumínica de cada cultivo. Las plantas solo aprovechan una pequeña fracción de la luz solar incidente (entre el 3% y el 6%) para alcanzar su máxima tasa

de fotosíntesis. Nagashima aprovechó este conocimiento para compartir el exceso de radiación solar con paneles fotovoltaicos, generando así electricidad. Su modelo se puede visualizar en la figura 1b.

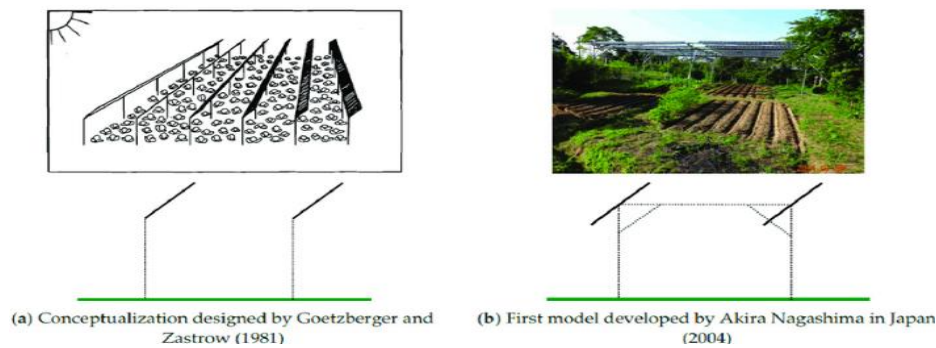


Figura 1. Primeros modelos de sistemas agro voltaicos: agricultura y energía solar fotovoltaica (APV). © Goetzberger y Zastrow (a), A. Nagashima (b).

Ahora bien, la base de la tecnología fotovoltaica se ha establecido sobre el principio de efecto fotovoltaico que fue observado por primera vez en 1839 por Edmons Becquerel. Sin embargo, fue necesario otro medio siglo para construir las células fotovoltaicas para su uso práctico. La primera práctica con celdas solares fue realizada en 1954, en Bell Telephone Laboratories (García, 2020). Posteriormente, se realizaron más investigaciones y desarrollo de obras de tecnología fotovoltaica para suministrar energía a los satélites espaciales; además, tras la crisis energética de la década de 1970 se incrementó el interés público por la aplicación de la energía solar fotovoltaica como fuente de energía eléctrica alternativa (Olaya, Arango-Aramburo y Larsen, 2016).

Los paneles solares orgánicos, también conocidos como OPV, son un tipo de panel solar que utiliza materiales orgánicos, como polímeros o moléculas orgánicas, para generar electricidad. Los materiales orgánicos son más baratos y fáciles de fabricar que los materiales inorgánicos, como el silicio, que se utilizan en los paneles solares tradicionales. Los paneles solares orgánicos están formados por una capa de material orgánico que se encuentra entre dos electrodos. Cuando la luz solar incide en el material orgánico, los electrones se excitan y se mueven a través de la capa orgánica, creando una corriente eléctrica. (Duque, 2023).

¿Pueden coexistir los cultivos y los paneles solares?

Una de las principales interrogantes se presenta en función de la dinámica de crecimiento y cultivo de las plantas. En ese sentido, investigadores como Heras (2024) han referido que en los parques solares agro voltaicos, los paneles fotovoltaicos (PV) están más espaciados para permitir que llegue más luz solar al suelo y se elevan más en el aire para que los cultivos, o incluso el ganado pequeño, como los corderos, puedan criarse debajo. Los estudios han encontrado que este enfoque en realidad puede ofrecer ventajas compuestas, como proteger a las plantas del calor excesivo, el frío y el daño de los rayos UV, aumentando así el rendimiento de ciertos cultivos, incluso cita que en un estudio se encontró que ciertos pimientos podrían alcanzar hasta tres veces su producción.

En países latinoamericanos, con una amplia extensión de tierras cultivables y una creciente demanda energética, la agro voltaica presenta un potencial considerable para contribuir a la seguridad alimentaria y energética. Sin embargo, surgen interrogantes sobre la compatibilidad de ambas actividades y su viabilidad en la región. Diversos estudios demuestran que la agro voltaica no solo es compatible con la agricultura, sino que puede incluso generar beneficios para los cultivos. En un estudio realizado en México, se observó que los paneles solares proporcionaban sombra a los cultivos, reduciendo la evapotranspiración y mejorando la eficiencia del uso del agua (Salazar et al., 2021), mientras que, en Colombia, se encontró que la agro voltaica podía aumentar el rendimiento de algunos cultivos, como el café, al protegerlos de las heladas y el exceso de sol (Garzón et al., 2022).

RESULTADOS

Las energías renovables son una oportunidad para mejorar la calidad de vida de las personas y proteger el planeta, ya que “para que funcionen las máquinas y calentar o enfriar nuestros hogares necesitamos abundante energía, pero no necesariamente de los combustibles fósiles” M. Ferro (2020). La evolución de los sistemas agrovoltáicos depende de varios factores, como el desarrollo tecnológico, la regulación legal, el apoyo

financiero y la aceptación social. Se espera que esta forma de producción sostenible se expanda en el futuro, contribuyendo a la transición energética.

La búsqueda de soluciones sostenibles para la producción de energía y alimentos ha impulsado el auge de la agrovoltaica, una práctica que combina la agricultura con la generación de energía solar fotovoltaica. En México, esta tecnología ha despertado un creciente interés en los últimos años, con diversos proyectos en desarrollo y propuestas académicas que exploran su potencial, especialmente en la última década, se han desarrollado diversos proyectos agrovoltaicos en México, tanto a nivel experimental como comercial.

Entre los ejemplos más destacados se encuentran la Parcela Agrovoltaica Sostenible y Educacional de la UNAM que fue Inaugurada en 2015, en la cual se combina la generación de energía solar con el cultivo de hortalizas y hierbas aromáticas. Es un proyecto pionero en su tipo, que combina la generación de energía solar fotovoltaica con la agricultura sostenible que se encuentra ubicado en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM, en la localidad de Topilejo, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, contando con una superficie de aproximadamente 350 metros cuadrados, en los que se instalaron 100 paneles solares con una capacidad de generación de 40 kilovatios pico. Los paneles solares están dispuestos sobre una estructura metálica que permite el paso de la luz solar hacia los cultivos ubicados debajo. (Gaceta UNAM, 2023)

En esta parcela agrovoltaica sostenible y educacional de la UNAM se cultivan diversos hortalizas, hierbas aromáticas y flores comestibles, utilizando técnicas de agricultura sostenible como la agroecología y la permacultura, ofreciendo beneficios desde la generación de energía solar limpia (utilizada para el autoconsumo de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia y para alimentar la red eléctrica nacional), además de la producción de alimentos sostenibles (frescos y saludables) utilizando técnicas de agricultura sostenible que no dañan el medio ambiente.

También la Parcela de la UNAM es un espacio para la investigación y educación en parques agrovoltaicos y agricultura sostenible, y es abierto a la comunidad para que conozca los beneficios de este avance en materia de aprovechamiento de la energía solar, recibiendo diversos reconocimientos, como el Premio Nacional al Uso Eficiente de la

Energía en 2016 y el Premio Interamericano a la Innovación para el Desarrollo Agrícola en 2018.

Otro de los proyectos que han logrado posicionarse como guía para el desarrollo de la visión de sostenibilidad agrovoltaica es el del IER-UNAM y Solarever. Esta iniciativa, lanzada en 2021, presenta un sistema único que permite dosificar la radiación solar para optimizar el crecimiento de los cultivos. Su iniciativa innovadora y prometedora para impulsar la agrovoltaica en México combina la generación de energía solar fotovoltaica con la agricultura, buscando optimizar el uso de la tierra y generar beneficios económicos, sociales y ambientales. (Zarco, 2023).

Por otra parte, el proyecto de IER-UNAM y Solarever, los paneles fotovoltaicos se encuentran dispuestos de manera estratégica, permitiendo el paso de luz solar filtrada hacia los cultivos, optimizando su crecimiento y evitando la sombra excesiva. Además, se emplean prácticas agrícolas sostenibles como la agroecología y la permacultura, minimizando el impacto ambiental y promoviendo la biodiversidad. El proyecto involucra investigación y desarrollo continuo para optimizar el sistema agrovoltaico, evaluar su desempeño y generar conocimiento científico y se busca involucrar a la comunidad local en el proyecto, brindando talleres, capacitaciones y fomentando la participación ciudadana. (Zarco, 2023a)

El Proyecto Piloto Agrovoltaico en Nextipac, Zacatecas, representa un avance significativo en la implementación de la agrovoltaica en México. Esta iniciativa, desarrollada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en colaboración con la empresa Agrovoltaics México, busca evaluar el rendimiento de un sistema agrovoltaico en un cultivo de agave mezcalero. Nextipac, Zacatecas, es una región reconocida por su producción de agave mezcalero, lo que brinda un contexto ideal para evaluar el impacto de la agrovoltaica en este cultivo. (Zarco, 2023b)

El sistema agrovoltaico está diseñado para optimizar la exposición a la luz solar de los agaves, permitiendo un crecimiento adecuado y preservando la calidad del mezcal. El proyecto involucra un riguroso seguimiento científico para evaluar el rendimiento del agave mezcalero bajo sombra parcial, el impacto en la calidad del mezcal y la eficiencia

del sistema agrovoltaico. La sombra parcial puede proteger a los agaves de condiciones climáticas extremas como el calor intenso o las heladas, mejorando su rendimiento y calidad. (Zarco, 2023b)

Sin embargo, las perspectivas para el Proyecto Piloto Agrovoltaico en Nextipac son positivas. Los resultados obtenidos hasta ahora han demostrado la viabilidad de la agrovoltaica en el cultivo de agave mezcalero, con un impacto positivo en el rendimiento y la calidad del mezcal. Se espera que, con el apoyo de políticas públicas adecuadas, la inversión en investigación y desarrollo, y la transferencia de tecnología, la agrovoltaica se convierta en una alternativa viable para la producción sostenible de agave mezcalero y energía limpia en México. (Zarco, 2023)

En síntesis, con sus características innovadoras, enfoque en la investigación y potencial para generar beneficios económicos, sociales y ambientales, estos proyectos tienen el potencial de contribuir a un futuro más sostenible y resiliente en las regiones del país. La superación de los desafíos existentes y la promoción de la investigación y el desarrollo permitirán que la agrovoltaica se consolide como una alternativa viable para la diversificación de ingresos de los productores agrícolas y la generación de energía limpia en México. (Zarco, 2023b)

CONCLUSIONES

a partir de la revisión realizada se puede notar como la energía de los fenómenos naturales pueden ofrecer una perspectiva prometedora para el futuro de las tecnologías renovables y su integración en un paradigma energético sostenible, en ese sentido, existen diversas tecnologías y configuraciones de parques agrovoltaicos, cada una con sus propias ventajas y aplicaciones. entre las tecnologías más comunes se encuentran los paneles solares fijos, los paneles solares bifaciales y los módulos solares concentradores. las configuraciones de los parques agrovoltaicos varían según la distancia entre las filas de paneles solares, la altura de los paneles y el tipo de cultivo.

los resultados obtenidos reflejan avances significativos en la tecnología de captura y conversión de energía renovable. se identificaron tendencias emergentes en la eficiencia

de la conversión fotovoltaica, así como mejoras en el diseño de paneles solares. además, se destacaron innovaciones en campos menos tradicionales como la generación de energía eléctrica en terrenos de cultivo o ganaderos. tal como se evidencia, las energías renovables representan una opción importante para el ahorro en demandas como la electricidad, pero también en otros costos vitales como el ambiente. por lo que es necesario promover los estudios que tiendan a disminuir el uso indiscriminado de los combustibles fósiles y se promueva el cambio definitivo hacia las energías renovables, ya que el ser humano solo cuenta con un hábitat donde puede sobrevivir de forma natural: el planeta tierra.

El desarrollo de parques fotovoltaicos en México ha experimentado un crecimiento significativo en la última década, impulsado por la creciente demanda de energía limpia, la disminución de costos de la tecnología solar y la implementación de políticas públicas favorables. la información proporcionada confirma esta hipótesis. los ejemplos de proyectos agrovoltaicos en México, como la parcela agrovoltaica sostenible y educativa de la UNAM y el proyecto piloto agrovoltaico en Nextipac, zacatecas, demuestran los beneficios tangibles de esta tecnología. la generación de energía limpia, el aumento de los ingresos de los agricultores y la protección del medio ambiente son algunos de los beneficios que se observan en estos proyectos.

con respecto a las implicaciones prácticas se puede destacar la reducción de las emisiones de carbono porque los parques agrovoltaicos pueden ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al generar energía limpia y renovable, reemplazando así la energía producida a partir de combustibles fósiles; es esencial en México donde se ha destacado la necesidad de reducir los niveles de contaminantes en el aire; en cuanto a su aplicación en el mundo real, es destacable como los parques agrovoltaicos ya se están utilizando en todo el mundo, incluyendo México, además, los gobiernos y las empresas privadas están invirtiendo cada vez más en parques agrovoltaicos, a medida que reconocen los beneficios ambientales y económicos de esta tecnología, por lo que la tecnología agrovoltaica está evolucionando rápidamente, con nuevos desarrollos que hacen que estos parques sean más eficientes y rentables.

por lo antes señalado, la agrovoltaica se presenta como una alternativa viable para la producción sostenible de alimentos y energía limpia en México. su potencial para generar

beneficios económicos, sociales y ambientales la convierte en una opción atractiva para el desarrollo rural y la transición energética del país. la superación de los desafíos existentes, como la inversión inicial y la aceptación social, y la promoción de la investigación y el desarrollo permitirán que la agrovoltaica se consolide como una tecnología clave para un futuro más sostenible y resiliente en México.

en cuanto a las recomendaciones es importante fomentar la investigación y el desarrollo de sistemas agrovoltaicos para esto resulta esencial aumentar la financiación pública y privada para la investigación y el desarrollo de tecnologías agrovoltaicas. esto incluye el apoyo a la investigación básica, aplicada y la demostración de tecnologías agrovoltaicas, además se recomienda colaborar con los agricultores para identificar y desarrollar sitios adecuados, esto debe hacerse de manera que se minimice el impacto en la producción agrícola y se maximicen los beneficios ambientales; mientras que desde el punto de vista profesional se debe proporcionar asistencia técnica y financiera a los agricultores para que puedan instalar y operar sistemas agrovoltaicos.

con respecto a las tendencias se observa un aumento de la eficiencia de los paneles solares: los paneles solares cada vez son más eficientes, lo que significa que pueden generar más electricidad con la misma cantidad de luz solar; además del desarrollo de nuevas tecnologías de seguimiento solar ya que las tecnologías de seguimiento solar permiten que los paneles solares se orienten hacia el sol durante el día, lo que aumenta su eficiencia. por otra parte, es importante considerar que el costo de las tecnologías agrovoltaicas ha disminuido significativamente en los últimos años, lo que las hace más accesibles para los agricultores y las empresas.

sobre las perspectivas futuras, se espera que la cultura agrovoltaica se expanda significativamente en los próximos años, impulsada por la creciente demanda de energía limpia y la necesidad de optimizar el uso del suelo, además, tiene el potencial de contribuir a la seguridad alimentaria, la generación de ingresos rurales y la mitigación del cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cabrera, E., & Luna, A. (2010). Potencial de aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 31(1), 101-108.

Del Cerro, J., & Caballero, M. (2022). México: 10 emprendedores sustentables. Editorial Planeta.

Duque, L. (2023). *Innovaciones que Transformarán Nuestra Vida: Explorando el Universo a Nivel Subatómico*. España: Luis Fernando Duque Martini.

Ferro, M. (2020). *El Universo de las Energías Renovables*, España: Ediciones José Manuel Ferro Veiga.

Gaceta UNAM. “Instalan la primera parcela agrovoltáica de México”, octubre 12, 2023, <https://www.gaceta.unam.mx/instalan-en-la-unam-la-primera-parcela-agrovoltáica-de-mexico/>

García, L. (2020). Avances en la tecnología de turbinas eólicas. *Revista de Energías Renovables*, 15(2), 34-45.

Garzón, A., Correa, J., & García, A. (2022). Agrivoltaic systems: A review of their potential for coffee production in Colombia. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4), 1-14.

González, F. J., Hernández, R., & Escamilla, J. A. (2016). Perspectivas para la energía fotovoltaica en México. *Energía Renovable y Sostenible*, 30(1), 1-10.

Guerrero Naranjo, N. (2023). Evaluación económico-energética de la tecnología agrivoltaica para los cultivos de cacao en Cabuyaro, Meta. Universidad de los Andes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/68214>

Olaya, Arango-Aramburo y Larsen, (2016). Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá. *Revista Científica* 3(30):263

Rösch C & Fakharizadehshirazi E. (2024). The spatial socio-technical potential of agrivoltaics in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 202, September 2024, 114706

Salazar, R., Hernández, R., & González, J. (2021). Potential of agrivoltaic systems in Mexico: A review. *Sustainable Energy Reviews*, 144, 106562.

Sanju J.; Sheffy T.; Ajith K. & Mohamed A. (2023). Solar parks: A review on impacts, mitigation mechanism through agrivoltaics and techno-economic analysis. *Energy Nexus*, Volume 11, September 2023, 100220, <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100220>

Sánchez, P. (octubre, 2021). Se inaugura en Francia un nuevo parque solar desarrollado por Dhamma Energy, ahora controlada por Eni. PV. Magazine, <https://www.pv-magazine.es/2021/10/20/se-inaugura-en-francia-un-nuevo-parque-solar-desarrollado-por-dhamma-energy-ahora-controlada-por-eni/#:~:text=pv%20magazine%20Espa%C3%B1a,Se%20inaugura%20en%20Francia%20un%20nuevo%20parque%20solar%20desarrollado%20por,las%20diez%20mayores%20en%20Francia>

Tamayo y Tamayo, M. (2001). El proceso de la investigación científica. México: Limusa.

Toledo C. & Scognamiglio, A. (2021). "Diseño y evaluación de sistemas agrovoltaicos: una revisión crítica y un modelo descriptivo hacia una visión del paisaje sostenible (patrones agrovoltaicos tridimensionales)" Sostenibilidad 13, no. 12: 6871. <https://doi.org/10.3390/su13126871>

Vilchis, C. (2020). Las energías híbridas y/o renovables como modelo alternativo de suministro para localidades aisladas de la red eléctrica en México, 2020: una propuesta de política pública. Repositorio del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Colecciones Ciencias Sociales, <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/636960>

Zarco, J. (2023a). "Nuevo proyecto de investigación agrovoltaica en el estado de Morelos", PV Magazine, Junio 23, 2023, <https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/06/23/nuevo-proyecto-de-investigacion-agrovoltaica-en-el-estado-de-morelos/>

Zarco, J. (2023b). "Agrovoltaica, punto de encuentro entre universitarios de la USEM y la 'Asociación México Canadá, Aprendiendo Juntos'", PV Magazine, Marzo 07, 2023, <https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/03/07/agrovoltaica-punto-de-encuentro-entre-universitarios-de-la-usem-y-la-asociacion-mexico-canada-aprendiendo-juntos/>