

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA



**ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA
AGROVOLTAICO CON BOMBEO DE AGUA PARA EL RIEGO DE
CULTIVOS EN LA REGIÓN DESÉRTICA DE BAJA CALIFORNIA**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA**

PRESENTA:
NAOMI AKANE SAGUCHI PÉREZ DE ALVA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. SAÚL ISLAS PEREDA

CODIRECTOR DE TESIS:
DR. NICOLÁS VELÁZQUEZ LIMÓN

MEXICALI BAJA CALIFORNIA A ENERO DE 2026

Dedicatoria

A mi madre, Juana Alicia Pérez de Alva. Gracias por esperarme con los brazos abiertos después de cada día difícil, por darme cariñitos en forma de tazas con café calentito y una almohada en mi espalda cada vez que trabajaba hasta tarde, por enseñarme a confiar en el proceso. Gracias por darme el coraje para soñar y prestarme tus ojos para darme cuenta de todo lo que soy capaz. Pero, sobre todo, por entregarme tu corazón cada día de mi vida. Todo lo que hago es por ti y para ti, te amo cinco mil.



A mis abuelos, Esther Alicia Noriega Ángeles y Roberto Pérez de Alva Blanco, quienes han sido mi ejemplo a seguir y mi pilar cada día de mi vida. Gracias por prenderme una veladora, rezar y encomendarme a San Judas, gracias por cuidar de mí, por mimarme y apoyarme en todas las decisiones que me llevaron hasta este momento.



A mi cómplice y mejor amigo, quien estuvo en las más altas y las más bajas. Gracias por compartir tu vida conmigo y maravillarme cada día con la persona que fuiste, eres y serás; por aligerar cualquier carga con una sonrisa y enseñarme que no hay imposibles. Gracias por caminar conmigo tomado de la mano y del corazón. Te amo.



Y a mi compañera incondicional que estuvo a mi lado en todas esas noches de desvelo que parecían interminables, por mover su colita con entusiasmo cuando le daba mimos entre descansos y recostarse a dormir en mi regazo por horas, gracias Conche.

Agradecimientos

Dr. Saúl Islas Pereda

Por despertar mi interés e introducirme al mundo de la investigación. Agradezco profundamente su infinita paciencia y su constante disposición para transmitirme conocimiento.

Dr. Nicolás Velázquez Limón

Por su pasión al compartir conocimiento y por el apoyo brindado a lo largo de este proceso.

Dr. Cristian Ascensión Casares De la Torre

Por su disponibilidad y amabilidad al auxiliarme siempre que surgió una interrogante.

SECIHTI

Por el apoyo financiero que hizo posible la realización de este trabajo de investigación.

Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California

Por brindarme un espacio de crecimiento académico y personal, y la oportunidad de desarrollar mi vocación.

Y a todas las personas que intervinieron directa e indirectamente en el desarrollo de este trabajo.

Resumen

En este trabajo se propone un enfoque para diseñar y evaluar sistemas agrovoltaicos integrales en comunidades rurales aisladas del desierto de Baja California, considerando de manera conjunta el abastecimiento de agua, la generación eléctrica y la producción agrícola. En lugar de analizar cada componente por separado, el planteamiento integra el nexo agua–energía–alimento para estudiar la operación del sistema como un todo, donde la estabilidad del suministro depende de la interacción entre la variabilidad solar, la demanda eléctrica, el requerimiento hídrico y el microclima bajo los módulos.

El Ejido Laguna Salada se emplea como caso de aplicación. A partir de su caracterización climática, geográfica y de infraestructura, se establece una propuesta de configuración y operación. Para examinar su desempeño se desarrolla un modelo matemático que combina estimación de recurso solar y potencia fotovoltaica, representación geométrica del sombreado a nivel de suelo, estimación de evapotranspiración y riego, modelado del bombeo mediante curvas técnicas, almacenamiento de agua e irrigación, y despacho eléctrico de una microrred con baterías, inversor y un respaldo diésel. El modelo se utiliza para simular dinámicas diarias y anuales y para implementar un dimensionamiento integral, apoyado con evidencia experimental a escala piloto y con parámetros reportados en literatura y fichas técnicas.

A partir del análisis de sombreado y aprovechamiento energético se identifica, para el sitio, una configuración consistente de módulos en orientación horizontal con una densidad agrovoltaica del 25% sobre el eje X (Este–Oeste), la cual permite una distribución de sombra más homogénea sin comprometer la compatibilidad agronómica. Bajo este arreglo, la lámina bruta de riego se reduce frente a cielo abierto en aproximadamente 16 a 22% para tomate, calabacita, trigo, zanahoria y berenjena, y alrededor de 5% para maíz, con un ahorro promedio cercano al 17.25%.

En términos hídricos, el almacenamiento resulta determinante para la robustez operativa. Para las demandas consideradas, un tanque de 182.4 m³ es suficiente para evitar déficit anual y disminuir la dependencia del riego respecto a la producción fotovoltaica instantánea. En torno al almacenamiento eléctrico, con un perfil horario anual construido

para 20 viviendas y un consumo total de 91,810.41 kWh por año, un banco de baterías de 156.3 kWh mejora la continuidad del suministro, reduce el uso del respaldo y permite alcanzar una fracción solar del 61% bajo un equilibrio razonable entre confiabilidad y dimensionamiento.

Como componente aplicado, se implementa un huerto agrovoltaico experimental de 630 Wp bifacial, con un área de cultivo de 2.97 m², instrumentado como plataforma demostrativa y de monitoreo. Adicionalmente, se desarrolla una réplica educativa en colaboración con una institución académica, acompañada por materiales de instalación, operación y actividades didácticas. En conjunto, este trabajo aporta un marco de diseño y evaluación que adapta la agrovoltaica a condiciones desérticas locales, orientado a convertir el recurso solar disponible en estabilidad hídrica y eléctrica y en opciones productivas viables para la comunidad.

Abstract

This study presents an integrated framework for the design and assessment of agrovoltaic systems in isolated rural communities located in the Baja California desert, simultaneously addressing water supply, electricity generation, and agricultural production. The proposed approach departs from component-wise analyses by explicitly adopting a water–energy–food nexus perspective, enabling the system to be evaluated as a coupled whole in which operational stability emerges from the interaction between solar resource variability, electrical demand, irrigation requirements, and the microclimate beneath photovoltaic modules.

Ejido Laguna Salada is selected as the case study. Based on a detailed climatic, geographic, and infrastructural characterization, a site-specific system configuration and operational strategy are proposed. System performance is evaluated through a mathematical model integrating solar resource assessment and photovoltaic power estimation, ground-level shading geometry, crop evapotranspiration and irrigation demand, pump operation based on technical performance curves, water storage and irrigation dynamics, and the electrical dispatch of a battery-supported microgrid with inverter and diesel backup. The model is applied to simulate both daily and annual dynamics and to perform an integrated system sizing, supported by pilot-scale experimental evidence and parameters reported in the literature and manufacturers' technical specifications.

Shading and energy-use analyses identify a consistent configuration for the site consisting of horizontally oriented photovoltaic modules with an agrovoltaic density of 25% along the East–West axis. This layout provides a more homogeneous shade distribution while preserving agronomic compatibility. Under this configuration, gross irrigation depth is reduced relative to open-field conditions by approximately 16–22% for tomato, zucchini, wheat, carrot, and eggplant, and by about 5% for maize, yielding an average irrigation water savings of 17.25%.

Water storage capacity is shown to be critical for operational robustness. For the evaluated demand levels, a 182.4 m³ storage tank eliminates annual water deficits and decouples irrigation scheduling from instantaneous photovoltaic generation. On the electrical side,

using an annual hourly load profile corresponding to 20 households with a total consumption of 91,810.41 kWh/yr, a 156.3 kWh battery bank enhances supply continuity, reduces reliance on diesel backup, and enables a solar fraction of 61%, representing a balanced trade-off between reliability and system sizing.

As an applied component, a 630 Wp bifacial agrovoltaic pilot garden with a cultivated area of 2.97 m² is implemented and instrumented as a demonstration and monitoring platform. In parallel, an educational replica is developed in collaboration with an academic institution, accompanied by installation guidelines, operational protocols, and didactic materials. Overall, the proposed framework demonstrates the potential of agrovoltaic systems to enhance water and energy resilience under desert conditions, translating abundant solar resources into viable and integrated community-level production systems.

Índice

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	VI
Índice	VIII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIV
Capítulo I: Introducción	1
1.1 Motivación.	2
1.2 Problemática y justificación.....	2
1.3 Antecedentes.	4
1.3.1 Tecnología agrovoltaica: sus inicios.	4
1.3.2 Estudios del cálculo de la radiación y su distribución espacial.....	6
1.3.3 Estudios de microclima.	9
1.3.4 Evaluaciones y estimaciones económicas.	13
1.4 Hipótesis	18
1.5 Objetivos: General y específicos.	18
1.6 Organización de la tesis.	19
Capítulo II: Fundamentos teóricos	22
2.1 Recurso solar, geometría y radiación.....	23
2.1.1 Radiación global, directa, difusa y albedo.	23
2.1.2 Recurso solar en México y la región de Mexicali, Baja California.	24
2.1.3 Geometría solar.	26
2.2 Tecnología fotovoltaica y sus características.....	32
2.2.1 Curva I-V.....	32
2.2.2 Tipos de tecnología fotovoltaica.	33
2.2.3 Sistemas fotovoltaicos.....	35
2.3 Bombeo de agua fotovoltaico.	36
2.3.1 Sistemas de bombeo de agua fotovoltaico.	36

2.3.2 Componentes de un sistema de bombeo de agua solar.	37
2.3.3 Cabeza de un sistema de bombeo de agua fotovoltaico.	38
2.4 Características de las plantas y riego.	38
2.4.1 Etapas de desarrollo de los cultivos.	38
2.4.2 Microclima.	39
2.4.3 Evapotranspiración.	39
2.4.4 Riego.	42
2.5 Fundamentos de agrovoltaica.	43
2.5.1 Sistemas agrovoltaicos.	43
2.5.2 Métricas clave en el diseño de sistemas agrovoltaicos.	45
2.6 Contexto climático y agrícola de México.	47
2.6.1 Clima en México y la región desértica de Baja California.	47
2.6.2 Agricultura en México y la región desértica de Baja California.	50
Capítulo III: Metodología.....	55
3.1 Alcances del proyecto.	56
3.2 Caso de estudio: Ejido Laguna Salada.	58
3.3 Propuesta de estudio: sistema agrovoltaico integral.	60
3.3.1 Descripción física.	61
3.3.2 Descripción operativa.	63
3.4 Modelo matemático.	64
3.4.1 Producción de energía fotovoltaica del sistema agrovoltaico.	64
3.4.2 Modelo de sombras.	67
3.4.3 Sistema de bombeo.	69
3.4.4 Sistema de riego.	70
3.4.5 Distribución y almacenamiento de energía.	71
3.5 Configuración y ejecución de la simulación.	73
3.6 Diseño experimental del pilotaje para la validación del modelo matemático.	76
3.7 Método integral de dimensionamiento agrovoltaico para zonas aisladas.	80
3.7.1 Identificación de recursos.	81
3.7.2 Productos esperados a partir de los recursos.	82
3.7.3 Cálculo de demandas y dimensionamiento.	82
3.7.4 Dimensionamiento del sistema agrovoltaico.	88

3.7.5 Verificación de viabilidad agrovoltaica: compatibilidad entre área, energía y agricultura.....	89
Capítulo IV: Resultados y discusión.....	92
4.1 Validación experimental del modelo matemático.....	93
4.1.1 Producción eléctrica fotovoltaica.....	93
4.1.2 Modelo de sombras.....	94
4.2 Aplicación del simulador al sitio de estudio.....	96
4.2.1 Sistema de bombeo.....	96
4.2.2 Modelado de sombras.....	99
4.3 Desarrollo y dimensionamiento de propuestas para el sitio de estudio.....	103
4.3.1 Determinación del arreglo fotovoltaico a implementar.....	103
4.3.2 Determinación de la densidad agrovoltaica a implementar.....	114
4.3.3 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de agua.....	118
4.3.4 Dimensionamiento de la microrred.....	122
4.3.5 Propuesta del sistema agrovoltaico integral para el ejido Laguna Salada.....	132
Capítulo V: Huerto agrovoltaico experimental.....	136
5.1 Introducción y objetivos del huerto agrovoltaico.....	137
5.1.1 Contexto y justificación: primer esfuerzo agrovoltaico en la región.....	137
5.2 Diseño estructural.....	138
5.2.1 Descripción general del huerto agrovoltaico.....	138
5.3 Construcción y puesta en marcha.....	139
5.4 Instrumentación y sensores instalados.....	142
5.5 Primera etapa agronómica.....	144
5.5.1 Germinación y trasplante.....	144
5.6 Réplica educativa y transferencia de conocimiento.....	147
5.6.1 Alianza con CBTA #328: contextualización y motivación.....	147
5.6.2 Instalación de la segunda versión del huerto en el plantel educativo.....	148
5.6.3 Entrega de documentación: guía de instalación, manual de usuario y actividades didácticas.....	149
5.6.4 Impacto educativo.....	150
Capítulo VI: Conclusiones y trabajos futuros.....	152
6.1 Conclusiones.....	153

6.2 Trabajos futuros.....	157
Bibliografía.....	161
Anexos.....	171
Anexo A.....	171
Anexo B.....	172
Anexo C.....	173
Anexo D.....	175
Anexo E.....	177
Anexo F.....	178
Anexo G.....	181

Lista de figuras

Figura 1. Interacción de la energía irradiada por el Sol con nuestro planeta.	23
Figura 2. Comportamiento de las radiaciones que llegan a la superficie terrestre.	24
Figura 3. Potencial eléctrico fotovoltaico en México.....	25
Figura 4. Representación gráfica del ángulo de declinación solar.	27
Figura 5. Representación gráfica del ángulo horario solar.....	28
Figura 6. Representación gráfica del ángulo de altitud solar.	29
Figura 7. Representación gráfica del ángulo acimutal solar.....	30
Figura 8. Representación gráfica del ángulo cenital solar.....	31
Figura 9. Representación gráfica del ángulo de incidencia solar.	32
Figura 10. Composición de la curva I-V de un panel solar.	33
Figura 11. Representación gráfica de paneles solares a base de Silicio.....	34
Figura 12. Representación gráfica de paneles solares a base de otros tipos de materiales.	35
Figura 13. Arquitectura de los tipos de sistemas fotovoltaicos.	36
Figura 14. Esquema de un sistema de bombeo de agua solar.	38
Figura 15. Etapas de desarrollo de los cultivos.	39
Figura 16. Representación gráfica del proceso de evapotranspiración.	41
Figura 17. Repartición de la evaporación y transpiración a lo largo del desarrollo de un cultivo.	42
Figura 18. Alturas en la estructura de un sistema agrovoltaico.....	44
Figura 19. Posicionamiento de los módulos en un sistema agrovoltaico.....	45
Figura 20. Tipos de clima en México [94].	48
Figura 21. Tipos de clima en Baja California.	50
Figura 22. Regiones agroalimentarias de México.	52
Figura 23. Secuencia de la metodología de la investigación.....	57

Figura 24. Imagen satelital del ejido Laguna Salada.....	60
Figura 25. Diagrama de la propuesta de estudio.	62
Figura 26. Curva de eficiencia (negro) y caudal de la bomba (azul) del caso de estudio. ..	70
Figura 27. Diagrama de flujo general de la simulación.....	75
Figura 28. Diagrama de la interacción energética entre los subsistemas de la simulación. 76	
Figura 29. Diagrama del pilotaje experimental.	77
Figura 30. Instalación del inversor de corriente en el pilotaje experimental.....	78
Figura 31. Instalación de los sensores de temperatura en el pilotaje experimental.....	79
Figura 32. Instalación del piranómetro debajo del pilotaje experimental.	80
Figura 33. Metodología para el dimensionamiento de un sistema agrovoltaico para una comunidad aislada.	91
Figura 34. Validación de la programación del modelo de generación fotovoltaica del sistema experimental.	94
Figura 35. Validación de la programación del modelo de sombras del sistema experimental.	95
Figura 36. Dinámicas operativas del sistema fotovoltaico de bombeo actual en el solsticio de verano.....	97
Figura 37. Dinámicas operativas del sistema fotovoltaico de bombeo actual en el equinoccio de otoño.....	98
Figura 38. Dinámicas operativas del sistema fotovoltaico de bombeo actual en el solsticio de invierno.	99
Figura 39. Predicción de la interacción de sombras para el solsticio de verano. a) Valores de irradiancia bajo el sistema fotovoltaico. b) Distribución de la irradiancia en el campo.	101
Figura 40. Predicción de la interacción de sombras para el equinoccio de otoño. a) Valores de irradiancia bajo el sistema fotovoltaico. b) Distribución de la irradiancia en el campo.	102
Figura 41. Predicción de la interacción de sombras para el solsticio de invierno. a) Valores de irradiancia bajo el sistema fotovoltaico. b) Distribución de la irradiancia en el campo.	103
Figura 42. Esquema de configuraciones fotovoltaicas evaluadas: arreglo convencional y tipo ajedrez; orientación vertical y horizontal; y definición de ejes X–Y para la variación de la densidad agrovoltaica.	104
Figura 43. Distribución de la radiación debajo de la configuración 1 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.....	106
Figura 44. Distribución de la radiación debajo de la configuración 2 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.....	107
Figura 45. Distribución de la radiación debajo de la configuración 3 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.....	109
Figura 46. Distribución de la radiación debajo de la configuración 4 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.....	110

Figura 47. Distribución de la radiación debajo de la configuración 5 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.....	112
Figura 48. Radiación promedio anual bajo el arreglo fotovoltaico de la configuración 2 a diferentes densidades agrovoltaicas y superposición de requerimientos lumínicos por cultivo.	116
Figura 49. Comparación de lámina bruta para los cultivos evaluados bajo dos escenarios: sin agrovoltaica (pleno sol) y con agrovoltaica (arreglo seleccionado).	117
Figura 50. Fracción de generación fotovoltaica destinada al bombeo y déficit anual de riego en función del área irrigada (escenario sin tanque).....	119
Figura 51. Sensibilidad del almacenamiento hídrico requerido ante incrementos del área irrigada de palma datilera (análisis de escalabilidad).....	120
Figura 52. Dimensionamiento del tanque: déficit anual de agua vs capacidad de almacenamiento.	122
Figura 53. Fracción solar y aporte anual del auxiliar vs capacidad del banco de baterías.	124
Figura 54. Dinámica diaria de la microrred para un banco de baterías subdimensionado (25.6 kWh).....	126
Figura 55. Dinámica diaria de la microrred para un banco de baterías cercano al ideal (168.96 kWh).....	128
Figura 56. Dinámica diaria de la microrred para un banco de baterías sobredimensionado (389.12 kWh).....	130
Figura 57. Costo unitario equivalente al suministro de la microrred en función de la capacidad del banco de baterías.....	132
Figura 58. Vista isométrica del huerto agrovoltaico experimental.....	139
Figura 59. Preparación del terreno. a) proceso de perforación del plano; b) instalación de los barrotes base de madera.	140
Figura 60. Estructura del huerto agrovoltaico que sostiene y ajusta la posición del módulo fotovoltaico.....	141
Figura 61. a) huerto agrovoltaico instalado; b) uniones de la estructura.....	142
Figura 62. Prueba y verificación de lectura de sensores Whisperer-2.	144
Figura 63. Proceso de siembra y germinación. a) emergencia de plántulas; b) aparición de cotiledones; c) emergencia de hoja verdadera.	145
Figura 64. a) incorporación de tutores; b) aparición de la floración.	146
Figura 65. Trasplante al huerto agrovoltaico.....	147
Figura 66. Proceso de instalación junto a estudiantes de CBTA #328.....	148
Figura 67. Huerto agrovoltaico en las instalaciones de CBTA #328.	149
Figura 68. Entrega de documentación. a) Portada del manual de usuario y guía de instalación del huerto agrovoltaico; b) entrega de documentación al director del plantel CBTA #328.	150
Figura 69. Ficha técnica del sistema de bombeo instalado en el sitio de estudio.	171
Figura 70. Ficha técnica del inversor de corriente utilizado en las pruebas experimentales.	172

Figura 71. Ficha técnica de la estación meteorológica utilizada en las pruebas experimentales.	174
Figura 72. Ficha técnica del módulo fotovoltaico instalado en el sitio de estudio.....	176
Figura 73. Ficha técnica del módulo fotovoltaico del arreglo del ejido Laguna Salada. ..	177
Figura 74. Ficha técnica del inversor de referencia para el dimensionamiento de la microrred.	178
Figura 75. Ficha técnica de las baterías de referencia para el dimensionamiento de la microrred.	180

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de aportes a la tecnología agrovoltaica dividida por paisaje bioclimático.	15
Tabla 2. Comparación de aportes en los sistemas de bombeo solar para irrigación dividido por paisajes bioclimáticos.....	17
Tabla 3. Cultivos representativos de México y la densidad agrovoltaica usada en la literatura.....	45
Tabla 4. Características de los climas en México [5],[6],[7],[8],[9]	48
Tabla 5. Volumen de producción y productos agrícolas principales por entidad destacada en agricultura.	51
Tabla 6. Regiones agroalimentarias de México.....	52
Tabla 7. Síntesis del sitio de estudio e infraestructura hídrico-energética existente (Ejido Laguna Salada).	58
Tabla 8. Cultivos representativos de México y sus requerimientos de radiación y periodos de desarrollo.	114
Tabla 9. Consideraciones técnicas y económicas para el dimensionamiento de la microrred.	123
Tabla 10. Indicadores del sistema agrovoltaico integral cultivando dátil con distintos cultivos complementarios.....	135

Capítulo I

INTRODUCCIÓN



*“La forma de comenzar es dejar de hablar
y empezar a hacer.”*

- Walt Disney.

1.1 Motivación.

A finales del último periodo glacial, mejor conocido como la Edad de Hielo, las condiciones climáticas de la Tierra se tornaron más favorecedoras para el desarrollo de la vida del ser humano. Debido al aumento de la temperatura ambiental empezaron a crecer pastos en los que se encontraban cereales como el centeno, el trigo y la cebada. Los seres humanos comenzaron a recolectar y almacenar estos brotes para alimentarse, cuando de pronto se descubrieron que las semillas que recolectaban podían ser sembradas y obtener las plantas de dónde venían; habían descubierto la agricultura [1]. A partir de ese punto el hombre fue incrementando sus habilidades agrícolas, lo que lo llevó a pasar de ser nómada a ser sedentario, aumentando la población gracias a ese nuevo estilo de vida y por ende potencializar el desarrollo de civilizaciones.

1.2 Problemática y justificación.

El crecimiento acelerado de la población y la expansión de las actividades productivas han intensificado la presión sobre los recursos naturales y la degradación ambiental, al incrementar el consumo de agua y energía y, con ello, la quema de combustibles fósiles, la urbanización y la contaminación asociada [2] [3]. De acuerdo con estimaciones de la ONU, la población mundial podría alcanzar ~9.7 mil millones de personas hacia 2050, lo que se asocia con un aumento importante en la demanda de agua y con una expansión de la población expuesta a estrés hídrico [4]. Estas presiones recaen de manera desproporcionada en el sector agrícola, principal usuario de agua dulce a nivel global, mientras que la FAO proyecta que la producción de alimentos deberá incrementarse sustancialmente hacia 2050 para satisfacer la demanda [5]. En regiones áridas y semiáridas, donde la agricultura depende del riego, el reto incluye tanto asegurar el abastecimiento de agua mediante extracción y bombeo, como gestionar su uso de forma eficiente bajo altas temperaturas y radiación que incrementan la evapotranspiración y el estrés térmico sobre los cultivos.

En México, una parte importante del territorio corresponde a zonas áridas y semiáridas, entre ellas la región desértica de Baja California, caracterizada por altas temperaturas, precipitaciones reducidas y elevada irradiancia solar. En este contexto, el riego suele depender de la extracción de agua subterránea, mientras que la infraestructura eléctrica

convencional presenta limitaciones de cobertura en comunidades rurales dispersas, con localidades fuera del alcance de la red. Como resultado, el suministro energético para actividades agrícolas y necesidades básicas recae con frecuencia en esquemas autónomos basados en combustibles fósiles, como motobombas a diésel, con costos de operación elevados, emisiones contaminantes y vulnerabilidad ante la variación en los precios de los combustibles.

Dentro de la región de Baja California, el Ejido Laguna Salada constituye un caso representativo de comunidad aislada del valle de Mexicali, donde la agricultura de riego es esencial para el sustento local y se realiza principalmente mediante operación manual. Aunque existe infraestructura fotovoltaica instalada para el bombeo, su operación se restringe a ventanas específicas de riego, lo que deja una fracción importante del recurso solar sin aprovechar durante el resto del día. La ausencia de condiciones que permitan continuidad y regulación del servicio limita el valor práctico de la instalación y su potencial para aportar beneficios adicionales a la comunidad.

En este escenario, la agrovoltaica se plantea como una solución para atender de manera conjunta retos energéticos e hídricos del sector agrícola en regiones áridas y semiáridas. Su fortaleza principal es la optimización del uso del suelo al permitir, en una misma superficie, la producción simultánea de electricidad y de alimentos. Además, la sombra parcial generada por los módulos fotovoltaicos puede regular la radiación incidente y el microclima sobre los cultivos, lo que favorece un uso más eficiente del agua al reducir la evapotranspiración y puede contribuir a proteger los cultivos frente a extremos climáticos frecuentes en ambientes desérticos. En conjunto, estos efectos pueden mejorar las condiciones de cultivo en periodos de calor intenso y abrir la posibilidad de diversificar especies y arreglos productivos bajo manejo local.

En el caso del Ejido Laguna Salada, donde ya existe infraestructura fotovoltaica para bombeo, pero su operación se limita a periodos cortos de riego, la transición hacia un esquema agrovoltaico ofrece una ruta clara para convertir esa instalación en un sistema más útil para la comunidad. Al incorporar almacenamiento de agua para riego y uso doméstico, el sistema podría mejorar la continuidad operativa incluso en días nublados y extender el beneficio del bombeo más allá de una ventana diaria limitada. Paralelamente, un arreglo agrovoltaico abre la posibilidad de utilizar el espacio bajo los módulos para producción

agrícola, diversificando la actividad del ejido, mientras que la electricidad disponible puede destinarse a demandas locales adicionales mediante una microrred o esquema de suministro comunitario. De este modo, la agrovoltaica no solo incrementa el aprovechamiento del recurso solar y de la infraestructura existente, sino que reorienta el sistema hacia beneficios productivos y sociales más amplios que el bombeo por sí solo.

1.3 Antecedentes.

Tecnología agrovoltaica

1.3.1 Tecnología agrovoltaica: sus inicios.

Para comenzar, resulta fundamental mencionar los orígenes de la agrovoltaica para permitirnos comprender cómo ha evolucionado a lo largo del tiempo y construir una base sólida de conocimiento.

La agroforestería se conoce como el precursor de la agrovoltaica; la cual es la incorporación deliberada de árboles en terrenos de cultivo o pastizales. Representa un enfoque sostenible para la gestión de la tierra, generando beneficios ecosistémicos como la reducción del impacto del cambio climático, al mismo tiempo que ofrece ventajas directas para los agricultores de pequeña escala [6]. Justo antes de que la agrovoltaica se diera a conocer, la interacción del microclima generado debajo de una arboleda de guaje se estudiaba por J.L. Monteith, C.K. Ong y J.E. Corlett. Se llevaron a cabo comparaciones entre diversas áreas para investigar cómo los componentes de un sistema agroforestal interactúan con su microclima, analizando aspectos como la captura de lluvia, la humedad, la temperatura, la velocidad del viento y la radiación [7]. De igual manera, en el desierto semiárido de Kenia, se analizó el microclima del sotobosque de árbol grevillea robusta y el rendimiento del cultivo de maíz en un sistema agroforestal, encontrando que la influencia de mejora de la sombra de los árboles en el microclima del sotobosque fue mayor en las temporadas de escasas precipitaciones [8].

Se les atribuye como los padres de la agrovoltaica a John Lennox Monteith y C. J. Moss, ya que investigaron acerca de la interacción de los cultivos con el clima. En 1977 en su publicación *“Climate and the efficiency of crop production in Britain”* estudiaron la

eficiencia de la producción de cultivos de papa, cebada, manzana y remolacha según el clima al que se les exponga a través de un modelo matemático propuesto por ellos mismos utilizando la ecuación de la transmisión de luz de la Ley de Beer-Lambert y la fórmula de Penman para el potencial de evaporación. Llegaron a la conclusión de que la materia seca de los cultivos está fuertemente relacionada a la radiación solar interceptada y que el crecimiento (al menos en Inglaterra) debe ser analizado en términos de la luz interceptada durante la temporada de crecimiento y la eficiencia con la que la luz interceptada es usada [9].

Tiempo después, en el año 1982, los físicos alemanes Adolf Goetzberger y Armin Zastrow tuvieron una idea que cambiaría la forma en la que se desarrollaba la agricultura. En su publicación llamada *“On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation”* para el Instituto Fraunhofer de Friburgo, Alemania, en donde es una zona de bosque caducifolio templado, propusieron algo jamás puesto antes sobre la mesa: combinar la producción de energía solar con el sector agrícola. En la publicación plantearon un arreglo fotovoltaico que pudiera ser usado para fines de agricultura, instalando módulos fotovoltaicos a 2 metros de altura del suelo que se usa para cultivos (en lugar de instalarlo directamente en el suelo como se hacía normalmente) y un espacio entre filas de 6 metros. Desarrollaron un modelo matemático para determinar la posición y la distancia entre los módulos fotovoltaicos, esto con el fin de estudiar cómo incidía la radiación solar en el suelo que estaba entre ellos [10].

Las contribuciones siguientes de la tecnología agrovoltaica pueden ser separadas en tres categorías principales: (1) cálculo de la radiación y su distribución espacial, donde entran las principales aportaciones donde su objetivo principal consiste en determinar y/o describir la forma en la que la radiación solar incide en el sistema y como se distribuye, (2) estudio de microclima, en los cuales la meta principal es el monitoreo y predicción de la interacción de las variables que se presentan en el microclima generado debajo de los paneles fotovoltaicos del sistema y, por último, (3) evaluaciones y estimaciones económicas las cuales se consideran críticas a la hora del planteamiento de un sistema agrovoltaico debido a que son de gran utilidad cuando se debe tomar decisiones de inversión, gestión y desarrollo.

1.3.2 Estudios del cálculo de la radiación y su distribución espacial.

En 2010 Dupraz et al. realizaron un estudio en la vegetación mediterránea de Montpellier, Francia para el trigo duro, en donde por primera vez se le atribuyó el nombre de “agrovoltaica”, donde se definía un sistema agrovoltaico como: “sistemas mixtos que asocian paneles solares y cultivos al mismo tiempo, en la misma área terrestre”. Hablaron de cómo optimizar el espacio agrícola y midieron la radiación fotosintéticamente activa (PAR) bajo los paneles fotovoltaicos de un arreglo fijo orientado hacia el sur a 4 metros de altura y 6.4 metros de separación entre filas, evaluando configuraciones en densidad media (HD) y densidad completa (FD). Concluyeron que los sistemas agrovoltaicos pueden ser altamente productivos, con incrementos en la productividad general del espacio de 60 a 70% [11]. Dos años después, en 2012, H. Marrou et al. hicieron una publicación llamada “*Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels*” en el mismo instituto de Montpellier, Francia. Se habló sobre la productividad y el uso eficiente de la radiación solar para el crecimiento de lechugas en la sombra parcial de módulos fotovoltaicos, a través de la propuesta de un modelo matemático y mediante el software R-cran se estimó la radiación disponible para las plantas, obteniendo un aumento en el área total de la hoja de lechuga al ser cultivadas en la sombra y un decremento en el número de hojas. El rendimiento de la lechuga se mantuvo gracias a una eficiencia de interceptación de radiación (RIE) mejorada en la sombra, mientras que la eficiencia de conversión de radiación (RCE) no cambió significativamente [12].

Siguiendo con la vegetación mediterránea y bosque caducifolio, en Europa se realizó un metanálisis con datos de dos enfoques experimentales (cultivos intercalados y sombreado artificial con telas, redes o paneles solares). El objetivo era evaluar cuantitativamente la susceptibilidad de diferentes tipos de cultivos de zonas templadas a niveles crecientes de sombra. Se desarrollaron curvas de respuesta de rendimiento específicas para cada tipo de cultivo en función de la reducción de la radiación solar, estimando los rendimientos relativos de los cultivos en comparación con los controles sin sombra. Sólo se incluyeron estudios que informaron una reducción de la radiación solar y el rendimiento de los cultivos por área en áreas templadas y subtropicales. Analizaron una variedad alta de cultivos, desde hortalizas frutales, tubérculos y maíz hasta hortalizas de hoja y leguminosas.

Los resultados sugirieron una relación no lineal entre los rendimientos de los cultivos logrados y la reducción de la radiación solar para todos los tipos de cultivos. Las bayas, las frutas y las hortalizas frutales se beneficiaron de una reducción de la radiación solar de hasta un 30 %.

Los forrajes, las hortalizas de hoja, los tubérculos/raíces y los cereales C3 inicialmente mostraron una pérdida de rendimiento de los cultivos menor que proporcional. Por el contrario, el maíz y las leguminosas de grano experimentaron fuertes pérdidas en el rendimiento de los cultivos incluso en niveles bajos de sombra. Los resultados proporcionan un conjunto de indicadores iniciales que pueden usarse para evaluar la idoneidad de los tipos de cultivos para sistemas de sombra y, por lo tanto, para sistemas agrovoltaicos u otros sistemas de doble uso de la tierra [13].

Meses después, en Suecia (Länna, Hyltemossa y Norunda), correspondiente a bosque caducifolio templado S. Ma Lu et al. en su publicación "*Photosynthetically active radiation decomposition models for agrivoltaic systems applications*", Se utilizaron modelos de referencia para descomponer la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en sus componentes directos y difusos. Se emplearon coeficientes de los modelos originales y ajustados localmente. Los resultados mostraron que los coeficientes no ajustados localmente tenían un rendimiento inferior en todos los modelos, pero mejoraron con la reparametrización, con un aumento del error del 35.24% en Länna. El modelo YANG2 mostró el mejor rendimiento, con un error del 23.75% en Norunda después de la reestimación de coeficientes. Para aplicar estos modelos en Suecia, se proporcionaron conjuntos de coeficientes a nivel de país después de la parametrización con datos combinados de tres ubicaciones, con errores del 25.08% (YANG2) y 28.60% (STARKE). Esto subraya la importancia de adaptar los modelos a las condiciones locales y sugiere que la metodología puede aplicarse de manera similar en otros países [14]. Seguido de esto, en Córdoba, España (vegetación mediterránea), se presenta una metodología utilizando las ecuaciones de Collares-Pereira para la caracterización de la incidencia de la radiación solar en diferentes puntos del terreno y así estimar la distribución de irradiancia solar en instalaciones agrovoltaicas en función de la geometría de la instalación fotovoltaica y de los niveles de irradiancia solar difusa y directa incidente sobre el terreno de cultivo. En base a

los resultados obtenidos se propone un modelo que correlaciona el potencial agrovoltaico de una planta fotovoltaica con sus variables de diseño. Asimismo, para la planta fotovoltaica “Alcolea 1”, se simuló los perfiles de decaimiento de la radiación solar en los carriles entre los colectores fotovoltaicos donde se plantarían los cultivos en caso de convertir esta planta en una instalación agrovoltaica. Así, la metodología propuesta representa una interesante forma de determinar el potencial agrovoltaico de instalaciones fotovoltaicas conectadas a red existentes [15].

Por otro lado, en la prefectura de Miyazaki, Japón (bosque caducifolio templado), se desarrolló un modelo matemático con el fin de estimar la fecha correcta de inicio de cultivo para cultivos cubiertos con paneles solares y así garantizar la fecha correcta de cosecha y determina los ingresos esperados de los agricultores mediante el cálculo de la producción agrícola y generación de energía. Utilizando el cultivo de taro en la prefectura de Miyazaki como estudio de caso, el modelo estimó que la fecha de inicio del cultivo debería adelantarse 23 días para garantizar el período de cosecha y la producción agrícola ideales. Esto evitaría una pérdida de oportunidades de 16,000 dólares al año para una superficie agrícola de 10,000 m^2 [16]. Para 2023 Sebastián Zainali et al. en su publicación “*Direct and diffuse shading factors modelling for the most representative agrivoltaic system layouts*”, desarrollaron conjuntos fotovoltaicos verticales fijos, de seguimiento en un eje y de seguimiento en dos ejes en Länna, Suecia, Estrees-Mons, Francia, y Klingenberg, Alemania (todos de tipo bosque caducifolio templado) con el fin de analizar las condiciones de sombra en el suelo utilizado para la producción de cultivos. Los modelos demostraron una precisión notable en comparación con software comercial como PVsyst y SketchUp. Estos modelos ayudarán a reducir la incertidumbre sobre el rendimiento de los cultivos en sistemas agrovoltaicos al proporcionar datos fotosintéticamente activos precisos.

La distribución de la radiación fotosintéticamente activa se analizó más a fondo utilizando un índice de homogeneidad de la luz, y los resultados mostraron que la homogeneidad y la reducción de la radiación fotosintéticamente activa variaron significativamente dependiendo del diseño del sistema agrovoltaico, oscilando entre 86-95% y 11-22%, respectivamente [17].

Tiempo después en el mismo año, para el bosque caducifolio templado en Grembergen Bélgica se evaluó el impacto de diferentes algoritmos para el seguimiento en producción y calidad de cultivos de betabel a través del desarrollo de un modelo para evaluar el uso de la eficiencia de la radiación (RUE) con mediciones de radiación fotosintéticamente activa (PAR) y se utilizó el software APSIM para simular la producción y calidad de los cultivos. Se hicieron mediciones durante 2 años (2021 y 2022). El seguimiento inteligente dio como resultado en 2021 un aumento en la producción de energía en 30% y eficiencia del uso del espacio de 20% manteniendo producción de cultivo similar a la configuración vertical mientras conservaba la radiación fotosintéticamente activa (PAR). Sin embargo, se observan limitaciones en el modelo durante 2022 debido a que fue un año seco, reduciendo su utilidad durante la etapa de diseño. Los autores remarcan la importancia de considerar estos factores junto con el clima, estructura y elección de cultivo para evaluar la eficiencia [18].

1.3.3 Estudios de microclima.

En Montpellier, Francia (vegetación mediterránea) se investigó sobre cómo la tasa de crecimiento de los cultivos de lechuga, pepino y trigo duro se veía afectada por el sombreado parcial observando cambios en el aire, temperatura del suelo y cosecha, radiación incidente, humedad, temperatura y velocidad del viento en el microclima. Concluyendo que la temperatura del aire y el déficit de presión del vapor no fueron significativamente diferentes, sin embargo, que la temperatura del cultivo fue alterada por el sombreado. Recalcando que, en la etapa temprana, a los cultivos podría afectarles la luz intensa [19]. En el mismo sitio de estudio, años después, Y. Elamri et al. estudiaron la cantidad de agua que se ahorra al usar sistemas agrovoltaicos con módulos inclinados. Usando el modelo FAO #56 en la agrovoltaica para el cálculo de la evapotranspiración, el modelo de Jarvis para la conductancia estomática y el LER (Land Equivalent Ratio). Analizaron sistemas de seguimiento de un eje con seguimiento controlado (CT) el cual minimiza la radiación interceptada en el cultivo de las 9 a las 14 horas y seguimiento solar (ST) para maximizar la radiación interceptada a 5 metros sobre el suelo. Se concluye que en su experimento se redujo la cantidad de agua utilizada para riego de lechuga en un 20% al

tolerar la disminución de la producción en 10%, recomendando que si se quisiera conservar la producción, se debía alargar el ciclo de cultivo y haciendo hincapié en que es una forma excelente de aprovechar el espacio para producir comida y energía en uno [20]. Ese mismo año, cuatro meses más adelante, en Corvallis Oregón (en bosque boreal) se estudia los efectos ambientales de un arreglo fotovoltaico con altura de 1.1 metros y 6 metros de espacio entre filas, orientado hacia el sur para pasto sin irrigar que experimenta estrés hídrico a menudo. Se consideraron cambios en la climatología, humedad del suelo uso del agua y producción de la biomasa para demostrar su impacto y la importancia de considerarlos en el diseño de granjas solares. Calcula el sombreado utilizando latitud, altura de arreglo, día y hora del año. Al final se observaron diferencias en la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad, dirección del viento y humedad del suelo (medida con una probeta de neutrones). Las áreas bajo los paneles fotovoltaicos se mantuvieron con más humedad en el suelo, así como con un aumento en la biomasa de final de temporada (90% más biomasa) teniendo áreas con mayor eficiencia de agua (328% más eficiente) [21].

Takashi Sekiyama y Akira Nagashima en su publicación “*Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop*” estudian la prefectura de Chiba en Japón, correspondiente a un bosque caducifolio templado con un sistema agrovoltaico en el cual se analizó el comportamiento de un cultivo de maíz, el cual es conocido por ser intolerante a la sombra. Los autores realizan un análisis de sensibilidad para medir la cantidad tradicional de biomasa seca del cultivo en tres configuraciones en un arreglo con 30° de inclinación: sin módulos (control), a baja densidad (LD, con espaciado entre filas de arreglo de 1.67 metros) y densidad alta (HD, con espaciado entre filas de arreglo de 0.71 metros). Dan como resultado que la biomasa del maíz producido bajo el sistema agrovoltaico a baja densidad (LD) y el rendimiento del cultivo fueron de un 4.9% y 5.6% mayor respectivamente que el cultivo producido convencionalmente [22].

En la región arbustiva xerofítica de Tucson, Estados Unidos, Greg Barron-Gafford habla de la problemática de agua y comida en las regiones áridas y comenta que al utilizar sistemas fotovoltaicos se genera un efecto isla de calor el cual calienta el área de las instalaciones haciendo que el rendimiento de los módulos decremente. Para comprobarlo, hace un

estudio de 3 meses donde implementa un sistema agrovoltaico con inclinación de 32° a altura de 3.3 metros para cultivos de jalapeño, chiltepín y tomate cherry. Observa niveles de irradiancia, temperatura del aire y humedad relativa (a 2.5 metros sobre la superficie de la tierra), humedad y temperatura de la tierra (a 5 centímetros de profundidad). Se prueban dos escenarios de irrigación: diaria y cada 2 días. Se encontró que el promedio diario acumulado de absorción de CO_2 mediante fotosíntesis por unidad de superficie foliar aumentó para el chiltepín y tomate, la eficiencia del uso del agua aumentó significativamente en el jalapeño y tomate, y la producción de cultivo aumento en el chiltepín y tomate. Ocurre también una reducción en temperaturas diurnas de los paneles solares, en el microclima y atenuación en la fluctuación de humedad del suelo en la agricultura de regadío [23].

Nuevamente en Corvallis, Estados Unidos se hace un estudio, pero ahora con tomate. Se observó el microclima y las características de crecimiento del cultivo en tres ubicaciones de un campo agrovoltaico (control, entre hileras y debajo de los paneles) y con dos tratamientos de riego diferentes (pleno y deficitario). Se calculó el Agotamiento Permisible de Gestión (Management Allowable Depleiton) el cual es el punto por debajo del cual no se debe agotar el agua disponible en el suelo para evitar un estrés hídrico excesivo y, por tanto, una reducción de la producción, así como la evotranspiración a través de la ecuación de Penman-Monteith. Los autores concluyen que el rendimiento total del cultivo fue mayor en las áreas de control completamente irrigadas y disminuyó a medida que aumentó la sombra, las áreas completamente irrigadas por hileras tuvieron 43.17 kg/hilera. Las áreas completamente irrigadas del panel tenían 55.25 kg/hilera. La productividad del agua en los tratamientos deficitarios entre hileras fue 53.98 kg/m³ mayor que el déficit control y 24.21 kg/m³ mayor que el déficit panel, respectivamente. Estos resultados indican el potencial de los sistemas agrovoltaicos para mejorar la productividad del agua incluso en cultivos que tradicionalmente se consideran intolerantes a la sombra [24].

Mientras tanto, en el bosque caducifolio templado de Hohenheim, Alemania, Axel Weselek et al. determinaron los efectos de la agrovoltaica en el cultivo de apio nabo, un tubérculo común en Europa Central. El apio nabo fue cultivado en 2017 y 2018 como parte de un

experimento en granja manejado orgánicamente, ambos debajo un sistema agrovoltaico y en condiciones de pleno Sol. Se monitor el microclima con diferentes sensores: VP-4 a 2 metros de altura del suelo para la medición de temperatura ambiente y humedad relativa, 5TM a 25 centímetros de profundidad para temperatura y humedad del suelo y el sensor QSO-S para la medición de la radiación fotosintéticamente activa (PAR). Bajo la agrovoltaica, la radiación activa fotosintética se redujo en aproximadamente un 30% y la altura de las plantas aumentó significativamente. El rendimiento de bulbo fresco disminuyó aproximadamente un 19% en 2017 y aumentó aproximadamente un 12% en 2018, pero los cambios no fueron significativos. La biomasa aérea aumentó en ambos años bajo agrovoltaica, pero sólo aumentó significativamente en 2018. Como la biomasa aérea es un determinante de la biomasa de la raíz en la cosecha en tubérculos, el rendimiento de los bulbos puede aumentar aún más mediante una vegetación prolongada bajo agrovoltaica.

Como los rendimientos cosechables no se redujeron significativamente, los autores llegan a la conclusión de que el apio nabo puede considerarse un cultivo apto para la agrovoltaica [25]. El mismo autor unos meses después realizó el análisis del impacto de la agrovoltaica en el microclima y cómo afecta al rendimiento de diferentes cultivos dentro de una rotación de cultivos orgánicos de apio nabo, trigo de invierno, papa y trébol en un bioma de bosque boreal (Lago Constanza, Alemania) tanto debajo del sistema agrovoltaico como sobre el suelo adyacente sin sistema. Este se realizó con un arreglo de paneles solares bifaciales de 3.4 metros de anchura con espacio entre filas de 6.3 metros, inclinado a 20 °.

En 2017 y 2018 se monitorearon los parámetros microclimáticos, el desarrollo de los cultivos y los rendimientos cosechables. En general, se confirmó una alteración en las condiciones microclimáticas y la producción de cultivos bajo agrovoltaica. La radiación fotosintética activa (PAR) se redujo en promedio aproximadamente un 30%. Durante el verano, la temperatura del suelo disminuyó bajo agrovoltaica en ambos años. Además, se observó una reducción de la humedad del suelo y de la temperatura del aire, así como una distribución alterada de la lluvia. En ambos años, la altura de las plantas de todos los cultivos aumentó. En 2017 y 2018, los rangos de rendimiento de los cultivos cultivados en comparación con el sitio de referencia fueron de -19 a +3% para el trigo de invierno, de -20 a +11% para la papa y de -8 a -5% para el trébol. En el caluroso y seco verano de 2018, los

rendimientos de los cultivos de trigo de invierno y papa aumentaron en un 2.7% y un 11%, respectivamente. Estos hallazgos muestran que es probable que se produzcan reducciones en el rendimiento bajo agrovoltaica, pero en condiciones climáticas cálidas y secas, las condiciones de crecimiento pueden volverse favorables [26].

Por último, dentro de las contribuciones al estudio del microclima, en la selva subtropical fría de Lawes, Australia, se modeló la producción de pastos subtropicales bajo diferentes instalaciones fotovoltaicas para evaluar los efectos de diferentes métodos de pastoreo sobre su biomasa. Se utilizó un sistema de inclinación fija, de seguimiento de un sólo eje y de seguimiento de doble eje para la calibración y validación del modelo en el software APSIM mostrando un rendimiento satisfactorio en la simulación de la producción, con la mejor correspondencia bajo el sistema de inclinación fija (valor observado 6073 kg ha^{-1} y valor simulado 6292 kg ha^{-1}). En comparación con las condiciones de pleno Sol, se encontró que la producción de biomasa era un 15.82, un 13.53 y un 8.03% mayor con la matriz de seguimiento de inclinación fija, de un sólo eje y de doble eje, respectivamente [27].

1.3.4 Evaluaciones y estimaciones económicas.

Harshavardhan Dinesh y Joshua M. Pearce en *“The potential of agrivoltaic systems”* encontraron que el valor económico de la electricidad solar generada junto a la producción de cultivo bajo la sombra incrementó un 30% a comparación de granjas que usan agricultura convencional. Evaluaron cultivos de lechuga en Kansas, Estados Unidos (estepa templada) en configuraciones de paneles solares a nivel suelo (con 1 metro de altura y espaciado de 6 metros entre filas) y configuraciones de paneles inclinados con cultivos debajo de ellos (a 4 metros de altura y un espaciado entre filas de 6.4 metros en densidad media y 3.2 en densidad completa). Gracias al software PVSyst se hizo una simulación del arreglo y con el modelo STICS (simulador multidisciplinario para cultivos estándar) se estimó el potencial técnico del sistema agrovoltaico. Se concluye que la utilización de cultivos tolerantes a la sombra permite minimizar las pérdidas de rendimiento de los cultivos y así mantener la estabilidad de los precios de los cultivos. Los resultados

mostraron un aumento en la energía fotovoltaica entre más de 40 y 70 GW si solo el cultivo de lechuga se convierte a sistemas agrovoltaicos en los Estados Unidos [28].

En Orissa, India (bosque monzónico) se diseñó en SOLIDWORKS y se evaluaron económicamente tres configuraciones de sistemas agrovoltaicos para una planta de 6 kWp de 40.47m² en donde el primero fue un arreglo de una fila con paneles continuos, el segundo un arreglo de dos filas con espaciado entre los paneles y el tercero un arreglo combinado, la fila de arriba con paneles continuos y la de abajo espaciados. Se tomaron en cuenta distintos desastres naturales probables para planificar y desarrollar. Los autores Nimay Chandra Giri y Ramesh Chandra Mohanty concluyen que los ingresos promedio de la planta solar y de agricultura serían de 2121.6 USD y 187.3 USD, el LER (Recuperación Local Económica), B/C ratio (Relación de Costo-Beneficio) y PPR (Relación Precio-Rendimiento) son de 1.42, 1.86 y 0.75, respectivamente. Utilizando agrovoltaica se logró moderar el microclima en 1-2°C y logró tener un retorno de la inversión de 2 a 3 años [29]

Uzair Jamil y Joshua M. Pearce analizaron el aumento potencial del rendimiento de los cultivos trigo y pastizal de convirtiendo plantas fotovoltaicas a agrovoltaicas en Saskatchewan, Canadá, (con los biomas de estepa templada y bosque boreal) a través de la agrovoltaica junto con sus implicaciones financieras. Se tomó en cuenta un sistema vertical (con inclinación de 90°) y con seguimiento en un eje viendo al Sur. Se revisó la legislación que podría influir en la adopción de la agrovoltaica en Saskatchewan y se desarrolló un modelo para calcular la producción hipotética de trigo y un modelo para determinar el potencial eléctrico con SAM (System Advisor Model). Específicamente, se analizan los resultados experimentales de la producción agrovoltaica de trigo para diferentes escenarios de adopción. Esto (junto con convertir el área para pastoreo de ovejas) genera potenciales miles de millones de dólares adicionales en ingresos agrícolas provinciales anuales [30].

Se puede decir que el desarrollo de un cultivo está fuertemente relacionado con las condiciones climatológicas del lugar donde se lleve a cabo la práctica agrícola. Se han organizado las aportaciones vistas en este estudio del estado del arte por paisajes

bioclimáticos en la Tabla 1 (tecnología agrovoltaica) y la Tabla 2 (sistemas de bombeo solar para la irrigación de cultivos).

Sistemas de bombeo fotovoltaico para el riego de cultivos

El aprovechamiento conjunto de la energía solar y la agricultura implica no solo la generación eléctrica, sino también una gestión eficiente del recurso hídrico. En este sentido, los sistemas de bombeo fotovoltaico fortalecen el vínculo entre energía y agua al permitir el riego autónomo en zonas rurales o aisladas sin depender de combustibles fósiles. Integrar esta tecnología dentro de un sistema agrovoltaico contribuye directamente a la seguridad hídrica, energética y alimentaria, eje central de esta investigación.

Diversos estudios han demostrado la viabilidad técnica y económica del bombeo solar en distintos contextos bioclimáticos. Por ello, este apartado (Tabla 2) revisa las principales contribuciones sobre sistemas fotovoltaicos de bombeo para irrigación, destacando su aplicación agrícola, estrategias de control, así como su desempeño energético y económico.

Tabla 1. Comparación de aportes a la tecnología agrovoltaica dividida por paisaje bioclimático.

LUGAR	PAISAJE BIOCLIMÁTICO	CULTIVO	ARREGLO O CONFIGURACIÓN	APORTE	
Gales, Reino Unido.	Bosque caducifolio templado	Papa, cebada, manzana y remolacha	-	Relación materia seca de los cultivos y la radiación solar interceptada.	[9]
Freiburg im Breisgau, Alemania	Bosque caducifolio templado	-	Módulos fotovoltaicos a 2 m de altura.	Modelo de posición y distancia entre los módulos.	[10]
Lanna, Hyltemossa y Norunda, Suecia.	Bosque caducifolio templado.	-	-	Modelo para descomponer el PAR en directa y difusa.	[14]
Prefectura de Miyazaki, Japón	Bosque caducifolio templado.	Papa.	-	Modelo para determinar la fecha óptima de siembra.	[16]
Lanna, Suecia, Estrees-Mons, Francia, Klingenberg, Alemania	Bosque caducifolio templado.	-	Esquematización de módulos verticales fijos, seguimiento en uno y dos ejes.	Análisis de distribución de la sombra	[17]
Grembergen, Bélgica.	Bosque caducifolio templado.	Betabel.	Módulos bifaciales: fijos verticales y seguimiento controlado en un eje. Espaciado de 9 m y altura de 2.6 m, ángulo de 25°.	Impacto de diferentes algoritmos de seguimiento en producción y calidad de los cultivos.	[18]
Prefectura de	Bosque caducifolio	Maíz.	Tres densidades, altura de	Análisis de sensibilidad a la	[22]

Chiba, Japón.	templado.		2.7 m, ángulo de 30°	sombra del cultivo.	
Hoheinheim, Alemania.	Bosque caducifolio templado.	Apio nabo.	Arreglo fotovoltaico de 24 m de largo y 19 m de ancho.	Rendimiento del cultivo y estudio del PAR.	[25]
Europa.	Vegetación mediterránea y bosque caducifolio templado.	Bayas, frutas, hortalizas frutales, forrajes, hortalizas de hoja, tubérculos/raíces, cereales C3, maíz y leguminosas de grano.	Cultivos intercalados y sombreado artificial con telas, redes y módulos.	Respuesta a distintos niveles de sombra.	[13]
Montpellier, Francia.	Vegetación mediterránea.	Trigo duro.	Sistema fijo a 4 m de altura, espaciado de 6.4 m y 3.2 m.	Optimización del espacio agrícola y estudio del PAR bajo los módulos.	[11]
Montpellier, Francia.	Vegetación mediterránea.	Lechuga, pepino y trigo duro.	Sistema fijo a 4 m de altura, espaciado de 6.4 m y 3.2 m.	Tasa del crecimiento de los cultivos bajo los módulos.	[19]
Córdoba, España	Vegetación mediterránea.	-	Sistema fijo orientado al sur.	Estimación de la distribución de la irradiancia en función de la geometría de la instalación.	[15]
Montpellier, Francia.	Vegetación mediterránea.	Lechuga	Sistema fijo a 4 m de altura, espaciado de 3.2 m y 1.6 m.	Estimación de la radiación disponible y su uso eficiente para el cultivo.	[12]
Montpellier, Francia.	Vegetación mediterránea.	Lechuga	Sistema fijo a 4 m de altura, espaciado de 6.4 m. Seguimiento en un eje: controlado y regular.	Estudio del ahorro del agua de riego.	[20]
Corvallis, Estados Unidos.	Taiga	Pasto	Sistema con altura de 1.1 m, espaciado de 6 m con inclinación de 18°	Efectos en pasto sin irrigar.	[21]
Corvallis, Estados Unidos.	Taiga	Tomate	Sistema con altura de 2.2 m, espaciado 6 m, con inclinación de 18°.	Estudio del cultivo bajo irrigación diaria y deficitario.	[24]
Lago Constance, Alemania.	Taiga.	Apio nabo, trigo de invierno, papa y trébol.	Sistema bifacial inclinado a 20° con espaciado de 6.3 m.	Estudio de los efectos climáticos en cultivos rotativos.	[26]
Saskatchewan, Canadá.	Taiga y estepa templada.	Trigo y pastizal	Esquematización de un arreglo vertical con seguimiento en un eje.	Análisis del aumento potencial del rendimiento de los cultivos.	[30]
Kansas, Estados Unidos.	Estepa templada	Lechuga.	Arreglos de: 1) 1 m de alto y espaciado de 6 m y 2) 4 m de alto y espaciado de 6.4 m y 3.2 m.	Evaluación económica de la electricidad generada junto a la producción de cultivo.	[32]
Tucson, Estados Unidos.	Arbustiva Xerofítica	Chiltepín, jalapeño y tomate cherry	Arreglo de 3.3 m de altura con una inclinación de 32°	Estudio de microclima e isla de calor en el sistema.	[23]
Lawes, Australia.	Selva subtropical fría.	Pasto subtropical.	Arreglo fotovoltaico fijo y con seguimiento en uno y dos ejes.	Modelo de producción bajo distintos sistemas.	[27]
Orissa, India.	Bosque monzónico.	-	Planta de 40.47 m ² Tres arreglos: 1) Una fila continuos. 2) Dos filas con	Diseño y evaluación económica de las tres configuraciones.	[29]

			espaciado entre módulos. 3) Dos filas combinado.		
--	--	--	---	--	--

Tabla 2. Comparación de aportes en los sistemas de bombeo solar para irrigación dividido por paisajes bioclimáticos.

LUGAR	PAISAJE BIOCLIMÁTICO	CULTIVO	ARREGLO O CONFIGURACIÓN	APORTE	
Osijek, Croacia	Bosque caducifolio templado	Tomate	Bomba 10%, altura de 1 m, descarga 20 m ³ /h.	Dimensionamiento de sistemas de bombeo fotovoltaicos.	[31]
Mazandara, Irán	Bosque caducifolio templado	Arroz	Arreglo con inclinación de 34° en un área de cultivo de 1 ha.	Dimensionamiento económico de la planta de bombeo.	[32]
Albacete, España	Vegetación mediterránea	Almendra	1 ha, riego subterráneo por goteo con energía solar, pozo a 200 m.	Esquemas de planificación de riego considerando el sitio.	[33]
Huesca, España	Vegetación mediterránea	-	Planta de 1.5 MW con seguimiento en un eje y 5 bombas.	Optimización de la operación horaria y costos.	[34]
Mequinez, Marruecos	Vegetación mediterránea	-	Sistema con dos configuraciones: 1) conexión directa PV-bomba 2) Con MPPT CC-CC.	Comparación de configuraciones de bombeo.	[35]
Adrar, Algeria	Arbustiva xerofítica	-	Motobomba DC en un arreglo a 34° de inclinación.	Estudio teórico de un sistema este-oeste de dos posiciones.	[36]
Jahrom y Kashmar, Iran	Arbustiva xerofítica y estepa seca	Huertos de cítricos y uvas	Bomba de 23 m ³ /h, un controlador de 4 kW y motor de 3.5 kW.	Comparación financiera con sistemas que utilizan combustibles fósiles o la red eléctrica.	[37]
Municipio de Fuxing, China	Selva subtropical fría	Kiwi.	Arreglo de paneles traslucidos de 360 m ² a 3 m de altura con inclinación de 16°.	Análisis de distintos niveles de sombreado en el cultivo.	[38]
Gardaya, Argelia	Desierto semiárido	-	Sistema con arreglo fotovoltaico, fuente de agua, tanque de almacenamiento y bomba de corriente directa.	Modelo de dimensionamiento para optimizar los tamaños de los componentes.	[39]
Karachi, Pakistan	Desierto semiárido	-	Sistema de 450 W, variador de frecuencia, disyuntores CA/CC, motor de inducción CA y bomba de centrifuga.	Diseño y análisis de eficiencia tomando en cuenta el sitio.	[40]
Prefectura autónoma tibetana de Golog, China	Tundra alpina	Alfalfa.	Sistema de bombeo para irrigar 3 ha.	Sistema de control según la demanda para bombear la cantidad requerida por los cultivos.	[41]
Condado de Dulan, China	Tundra alpina	Pastizal.	Arreglo con un área de 25 m ² .	Evaluación de la viabilidad y el rendimiento calculando	[42]

				la demanda de agua.	
Sokoto, Nigeria	Sabana Herbácea	Pepino, melón, frijol, mijo, sorgo y haba de soya.	-	Diseño y evaluación económica considerando la altura total del sistema y radiación solar.	[43]
Patan, India	Sabana Herbácea	Calabaza, sandía, cúrcuma, jengibre, quimbombó y chile.	Planta de 3 MW con cultivos entre y debajo de los paneles con muros protectores.	Estudio socioeconómico y de viabilidad.	[44]
Gambang, Malasia	Selva tropical	-	Arreglo de 100 W, batería de 12 V para almacenamiento con bomba DC 100W y caudal de 6.5 L/min.	Diseño portátil habilitado para Internet de las cosas.	[45]
Secunderabad y Warangal, India	Bosque seco subtropical	-	Módulo de 10 W conectado a un motor y baterías que alimenta una bomba a 2.15 m.	Algoritmo de seguimiento solar y control	[46]
Kundrathur, India	Bosque seco subtropical	-	Sistema orientado al sur e inversor de corriente.	Optimización del ángulo de inclinación y la orientación.	[47]
Ying, Ghana	Sabana arbolada	-	Módulos de 175W con una bomba rotor helicoidal en un pozo de 10 m.	Comparación de 10 configuraciones de bombeo (sistema fijo, seguimiento en uno y dos ejes).	[48]

1.4 Hipótesis

La implementación de sistemas agrovoltaicos en comunidades aisladas de la región desértica de Baja California favorece el uso eficiente del agua de riego, mejora el aprovechamiento de la energía solar y promueve una producción agrícola diversificada y sostenible, contribuyendo a fortalecer la seguridad hídrica, energética y alimentaria de la región.

1.5 Objetivos: General y específicos.

General

Proponer la implementación de un sistema agrovoltaico en el Ejido Laguna Salada, en la región desértica de Baja California, mediante el desarrollo y aplicación de un método integral de dimensionamiento replicable, que permita determinar configuraciones óptimas para el aprovechamiento eficiente del agua, la generación de energía eléctrica y el fortalecimiento de la producción agrícola en comunidades aisladas.

Específicos

- Realizar el estado del arte sobre sistemas agrovoltaicos, abordando su evolución tecnológica, estudios de radiación, microclima y análisis económico, con énfasis en su aplicación al riego agrícola.
- Generar la propuesta tecnológica de un sistema agrovoltaico en Baja California, integrando generación fotovoltaica, bombeo de agua y demanda eléctrica residencial y comercial.
- Desarrollar un modelo matemático que represente la propuesta tecnológica del sistema agrovoltaico en Baja California bajo diferentes configuraciones y condiciones operativas.
- Validar y comparar el modelo matemático mediante datos experimentales y literatura de referencia.
- Proponer un método integral de dimensionamiento agrovoltaico para zonas aisladas que permita determinar configuraciones óptimas considerando la disponibilidad de recursos, la variabilidad climática y la jerarquización de las demandas agrícolas, domésticas y comerciales.
- Aplicar el método de dimensionamiento en el caso de estudio, cuantificando el potencial agrovoltaico y generando propuestas que impulsen el desarrollo sostenible y la resiliencia de la comunidad.

1.6 Organización de la tesis.

En el Capítulo 1 se presenta el contexto que motiva el estudio, enfatizando los retos agua–energía–alimento en zonas áridas y la pertinencia de soluciones agrovoltaicas para comunidades rurales aisladas. Se expone la problemática del sitio de estudio, se revisan antecedentes clave relacionados con la agrovoltaica, el modelado de radiación y sombras, el microclima y la evaluación técnico–económica, y finalmente se establecen la hipótesis, los objetivos general y específicos, así como la estructura del documento.

El Capítulo 2 reúne los fundamentos teóricos necesarios para sustentar el enfoque teórico–experimental. Se abordan el recurso solar, la geometría solar y los componentes de la radiación; la tecnología fotovoltaica y sus características de operación; los principios y

elementos de los sistemas de bombeo fotovoltaico; y los conceptos agronómicos asociados al riego, las etapas de desarrollo de los cultivos y el microclima bajo condiciones de radiación modificada.

En el Capítulo 3 se desarrolla la metodología bajo un enfoque práctico y replicable orientado al diseño y evaluación de sistemas agrovoltaicos integrales. Se definen los alcances del proyecto y el caso de estudio del Ejido Laguna Salada, y se plantea una propuesta de sistema agrovoltaico integral con descripción física y operativa. Posteriormente, se formula un modelo matemático que integra la producción fotovoltaica, el modelo de sombras, el bombeo, el riego y la distribución de energía, así como la configuración de la simulación. Se establece además el diseño experimental del pilotaje para validar componentes clave del modelo y se propone un método integral de dimensionamiento para zonas aisladas, incluyendo la identificación de recursos, el cálculo de demandas, el dimensionamiento del sistema y la verificación de compatibilidad entre área, energía y agricultura.

El Capítulo 4 presenta los resultados y su discusión, iniciando con la validación experimental del modelo matemático mediante la evaluación de la producción fotovoltaica y del modelo de sombras. A continuación, se aplica el simulador al sitio de estudio para analizar el desempeño del sistema de bombeo y el comportamiento del sombreado en condiciones representativas. Finalmente, se desarrolla el dimensionamiento de las propuestas para el ejido, incluyendo la determinación del arreglo fotovoltaico, la densidad agrovoltaica, el almacenamiento de agua, el almacenamiento eléctrico en microrred, y la integración de una propuesta final de sistema agrovoltaico integral para Laguna Salada.

El Capítulo 5 documenta el desarrollo del huerto agrovoltaico experimental como una plataforma demostrativa y de seguimiento, describiendo sus objetivos, el diseño estructural, la construcción y puesta en marcha, así como la instrumentación y sensores instalados. Se presenta también la primera etapa agronómica con un cultivo inicial de pepino, incorporando registro fotográfico, observaciones preliminares del desarrollo vegetal e integración de datos agronómicos y microclimáticos. Adicionalmente, se incluye la réplica educativa y los elementos de transferencia de conocimiento asociados al piloto.

Finalmente, el Capítulo 6 sintetiza las conclusiones generales del estudio y plantea trabajos futuros, destacando los hallazgos principales del dimensionamiento y los compromisos técnicos identificados para asegurar continuidad operativa y resiliencia en contextos aislados. Se proponen líneas de continuidad centradas en validación agronómica y microclimática, refinamiento de parámetros locales y evaluación extendida del desempeño del sistema en condiciones reales, complementadas por los anexos que respaldan la información técnica desarrollada.

Capítulo II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS



*“El conocimiento es una aventura sin fin al
borde de la incertidumbre.”*

- Jacob Bronowski.

2.1 Recurso solar, geometría y radiación

El Sol libera gran cantidad de energía hacia el espacio que se transporta a través de radiación mediante fotones que van actuando con la materia en procesos de absorción y emisión. Solamente una parte de esa energía llega a la superficie terrestre debido a que parte de esta es reflejada y absorbida por la atmósfera y reflejada al espacio. La radiación que finalmente alcanza la superficie se divide en radiación directa, radiación difusa y albedo (Figura 1) [49] [50].

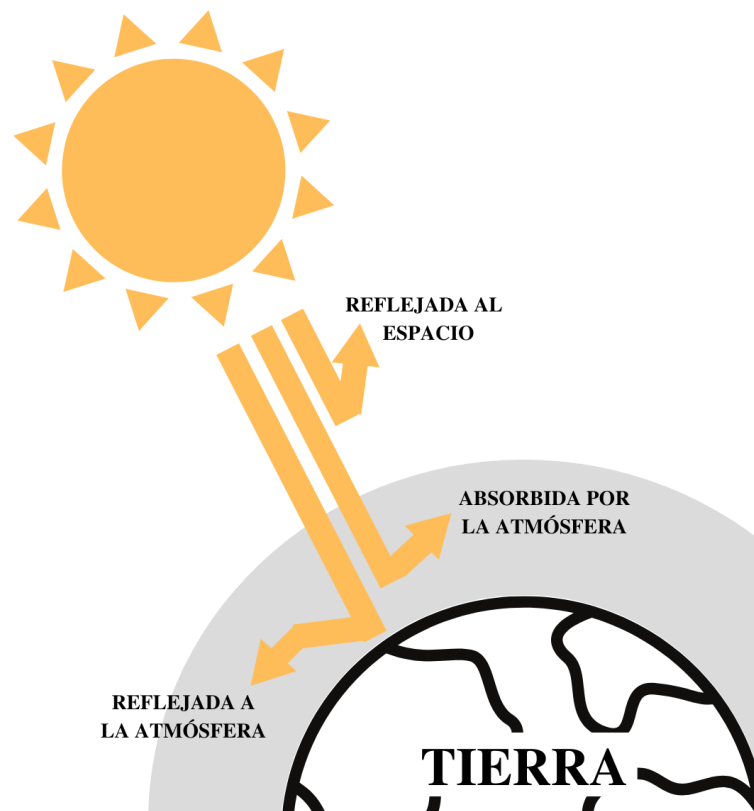


Figura 1. Interacción de la energía irradiada por el Sol con nuestro planeta.

2.1.1 Radiación global, directa, difusa y albedo.

Directa: Energía que se recibe directamente desde el Sol en la superficie sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera. Es la radiación incidente y depende de la posición del Sol.

Difusa: Proviene de la atmósfera y se da a causa de la dispersión de la dirección de la radiación solar debido a las moléculas en ella, se dirige en todas direcciones.

Albedo: También conocida como reflejada, procede de la superficie terrestre y otros objetos, debido a la reflexión de la radiación incidente sobre el entorno.

Global: Es la suma de las radiaciones directa, difusa y albedo (véase Figura 2).

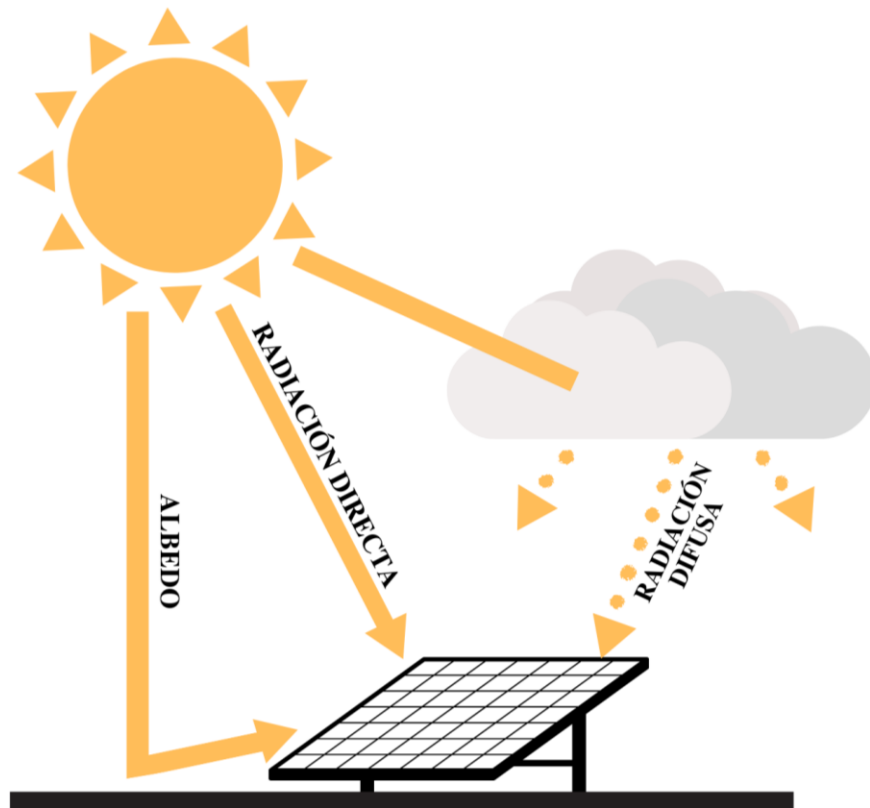


Figura 2. Comportamiento de las radiaciones que llegan a la superficie terrestre.

2.1.2 Recurso solar en México y la región de Mexicali, Baja California.

México se considera como un área bastante prometedora en cuanto a la aplicación de la energía solar fotovoltaica ya que es un país con un alto nivel de irradiación solar, en especial la región Noroeste, principalmente Baja California, Sonora, Sinaloa, Durango y parte de Coahuila y Chihuahua. Según el DOF (Diario Oficial de la Federación), se pueden alcanzar hasta los $6.3 \text{ kWh}/\text{m}^2$ por día en esta región [51]. En la Figura 3 se muestra el potencial eléctrico fotovoltaico de México.

POTENCIAL ELÉCTRICO FOTOVOLTAICO MÉXICO

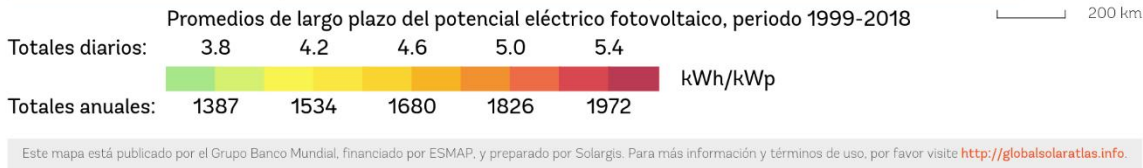
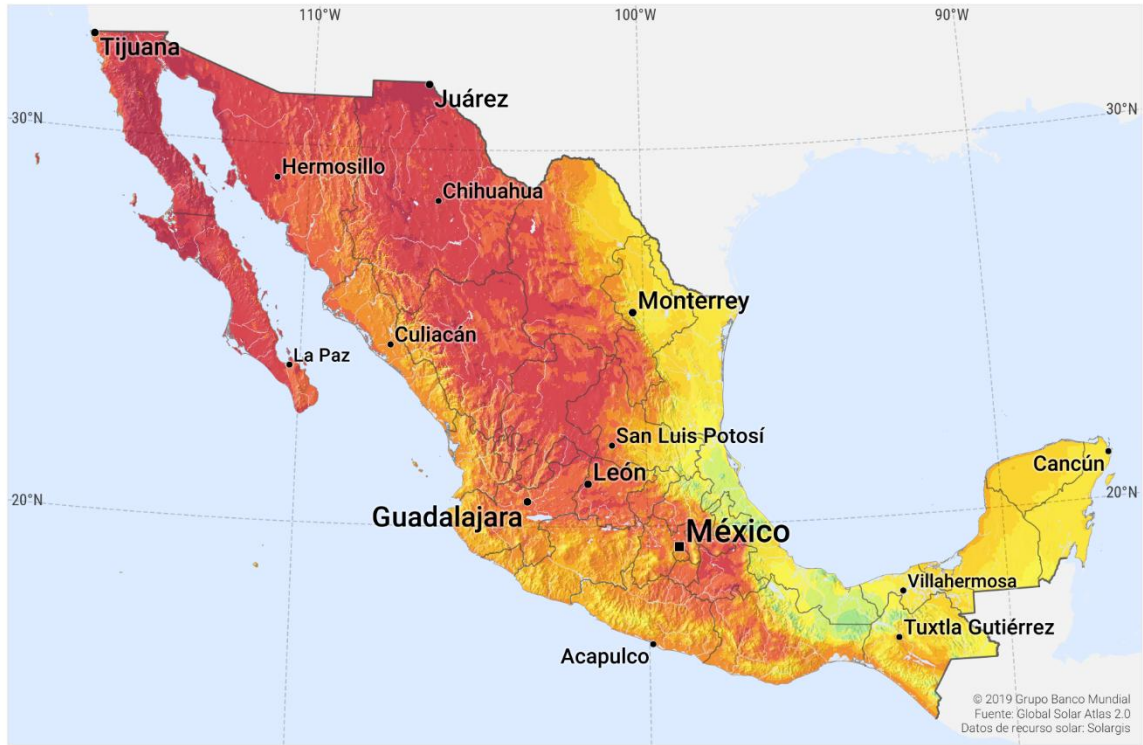


Figura 3. Potencial eléctrico fotovoltaico en México.

La ciudad de Mexicali conocida como “la ciudad que capturó el Sol” está ubicada al noroeste del país, en el estado de Baja California y cuenta con un excelente nivel de radiación solar. En los meses de mayo y junio la irradiancia promedio mensual supera los 225 kWh/m^2 [52] y se estima que diariamente se tiene un promedio de 5.5 kWh/m^2 , lo cual la hace un lugar con un gran potencial para la aplicación de la generación de energía solar fotovoltaica.

2.1.3 Geometría solar.

Al ser el recurso solar una fuente de energía inagotable puede ser transformada en energía eléctrica para su aprovechamiento. Si tomamos como referencia los recorridos que realiza el Sol y su localización a lo largo del tiempo; es posible representar la manera en la que entran los rayos a nuestro planeta de forma geométrica con geometría solar para así predecir su interacción con la superficie terrestre [53]. Para su estudio intervienen diferentes variables y conceptos.

2.1.3.1 Tiempo solar verdadero.

El tiempo solar (T_S) se basa en el movimiento del Sol a lo largo de la bóveda celeste, en donde el medio día solar es el momento en donde cruza por el meridiano del observador, alcanzando su máxima altura. Es importante tener en cuenta que el tiempo solar no coincide con el tiempo local o civil (T_C).

Si se quiere convertir el tiempo civil en tiempo solar se deben hacer dos correcciones; siendo la constante de corrección de tiempo (F_{CT}) dada por la diferencia en la hora solar según la zona horaria en la que se encuentre debido a la variación de longitud y la corrección de la ecuación del tiempo (E) que toma en cuenta la excentricidad de la órbita terrestre y la inclinación axial de la Tierra que afectan al tiempo en que el Sol cruza el meridiano del observador.

El tiempo solar se define por la ecuación (1).

$$T_S = T_C + \frac{F_{CT}}{60} \quad (1)$$

Para conseguir el factor de corrección de tiempo se debe aplicar la ecuación (2)

$$F_{CT} = 4(\text{Longitud} - \text{LSTM}) + E \quad (2)$$

En donde el factor de 4 minutos proviene del hecho de que la Tierra rota 1° sobre su mismo eje cada 4 minutos. La ecuación del tiempo E que representa la diferencia entre el tiempo solar medio y el tiempo solar aparente está dada en minutos.

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868(\cos B) - 0.032077(\sin \sin B) - 0.014615(\cos 2B) - 0.04089(\sin \sin 2B)) \quad (3)$$

En donde B se define por la ecuación (4) y n es el día del año

$$B = (n - 1) + \left(\frac{360}{365}\right) \quad (4)$$

LSTM es la hora estándar local del meridiano el cual es un meridiano de referencia usado para la zona horaria de interés que puede ser calculado con la ecuación (5).

$$LSTM = 15^\circ \Delta T_{UTC} \quad (5)$$

Donde T_{UTC} es la diferencia entre la hora local y la hora coordinada universal (UTC) en horas y los 15° hacen referencia al número de grados que la Tierra rota sobre su mismo eje cada hora.

2.1.3.2 Ángulo de declinación solar.

El ángulo de declinación solar (δ) (Figura 4) hace referencia al ángulo formado entre el plano ecuatorial de la Tierra y el centro del Sol. En el hemisferio Norte es positivo y en el Sur negativo.

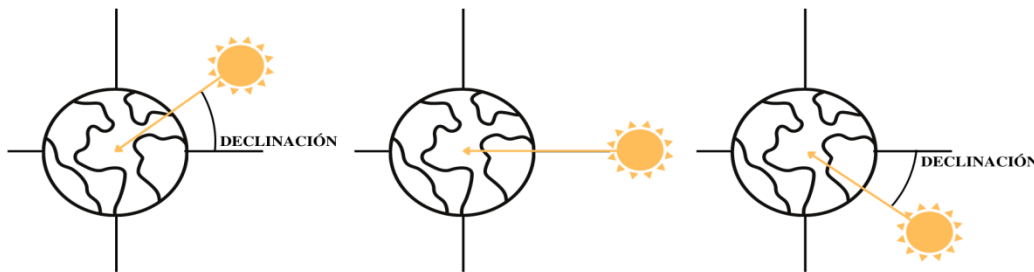


Figura 4. Representación gráfica del ángulo de declinación solar.

Este puede ser calculado con la ecuación (6).

$$\delta = 23.45 * \text{sen} \left(360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right) \quad (6)$$

En donde n representa el número del día del año en el que se hace el análisis.

2.1.3.3 Ángulo horario solar.

El ángulo horario solar (ω) (Figura 5) es el desplazamiento angular del Sol desde el Este hasta el Oeste a partir del meridiano local, debido a la rotación sobre su eje, donde son 15° por hora, es negativo en la mañana y positivo por la tarde.

Definido por la ecuación (7)

$$\omega = 15(T_s - 12) \quad (7)$$

Donde el número 12 representa la máxima altura solar alcanzada en un día (12:00 PM).

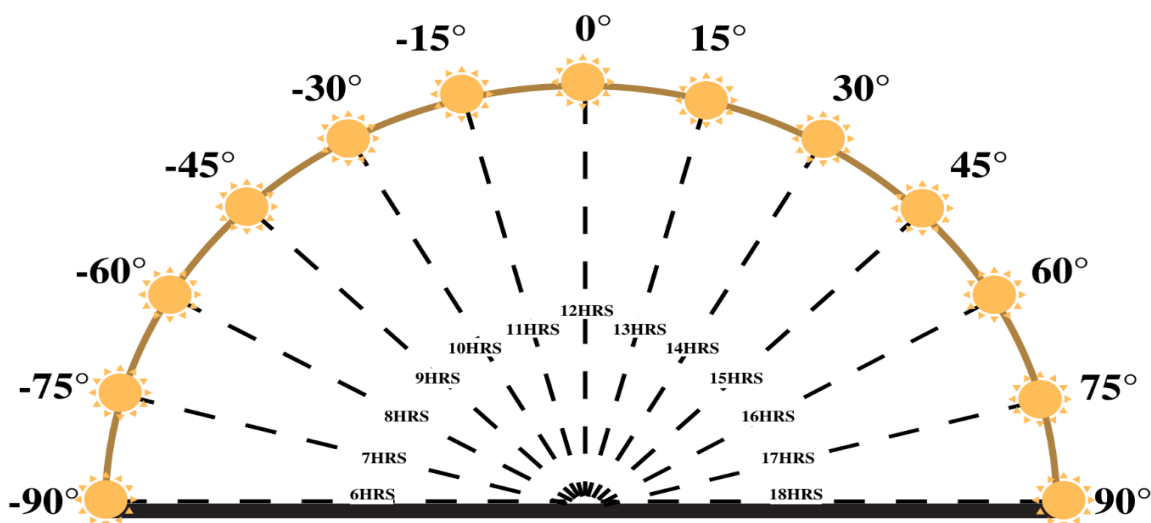


Figura 5. Representación gráfica del ángulo horario solar.

2.1.3.4 Ángulo de altitud solar.

El ángulo de altitud solar (α_s) (Figura 6) es el ángulo formado entre la horizontal y la línea que forman los rayos del Sol.

$$\alpha_s = \sin^{-1}((\sin\delta)(\sin\phi)) + (\cos\delta)(\cos\phi)(\cos\omega) \quad (8)$$

En la cual ϕ representa a la latitud del lugar donde se hace el análisis.

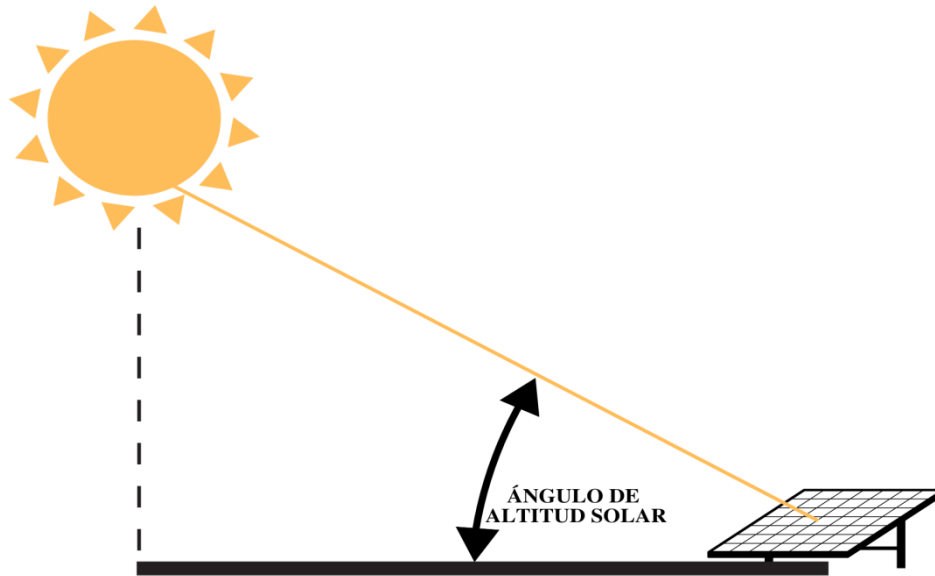


Figura 6. Representación gráfica del ángulo de altitud solar.

2.1.3.5 Ángulo acimutal solar.

El ángulo acimutal del Sol (γ_s) (Figura 7) es aquel que se forma entre la línea que proyecta el rayo del Sol con una superficie horizontal con respecto a la línea que se forma en el Sur geográfico. Se le considera negativo cuando el desplazamiento del Sol es de Sur a Este, y positivo cuando es de Sur a Oeste.

$$\gamma_s = \sin^{-1}\left(\frac{(\cos\delta)(\sin\omega)}{\cos \alpha_s}\right) \quad (9)$$

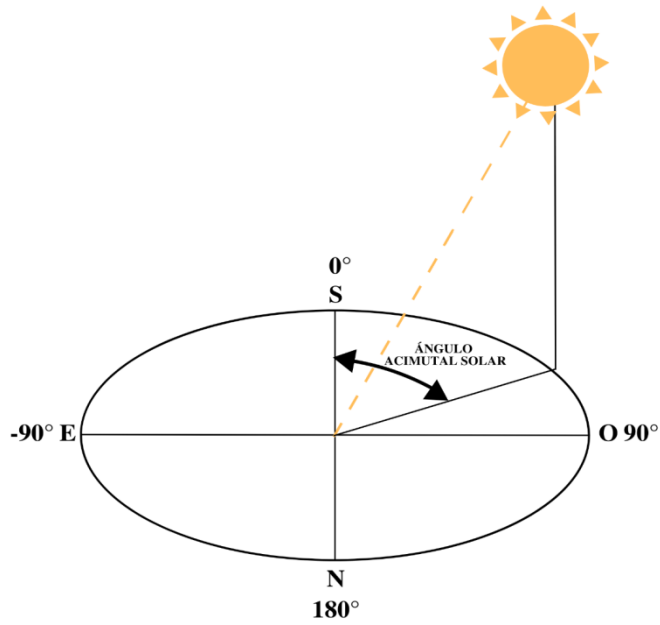


Figura 7. Representación gráfica del ángulo acimutal solar.

2.1.3.6 Ángulo cenital solar.

El ángulo cenital solar (θ_z) (Figura 8) se define como el ángulo formado entre la vertical con respecto al horizonte y la línea que forman los rayos del Sol.

$$\theta_z = 90 - \alpha_s \quad (10)$$

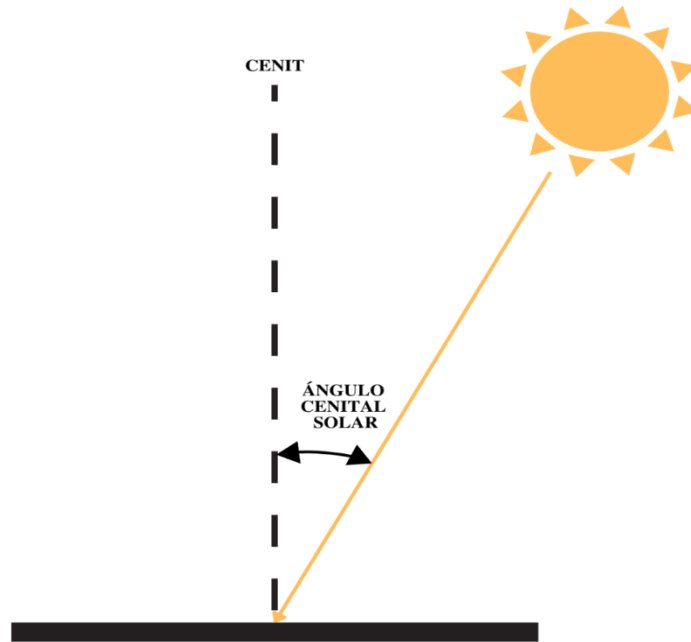


Figura 8. Representación gráfica del ángulo cenital solar.

2.1.3.7 Ángulo de incidencia solar.

El ángulo de incidencia solar (θ_i) (Figura 9) es aquel que se forma entre la línea que forma la radiación directa al incidir sobre una superficie con respecto a la línea normal de dicha superficie [53].

$$\begin{aligned}
 \cos(\theta_i) = & (\sin(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma_s)) \\
 & + \cos(\delta) \cos(L) \cos(\beta) \cos(\omega) \\
 & + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma_s) \cos(\omega) \\
 & + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma_s) \sin(\omega)
 \end{aligned} \quad (11)$$

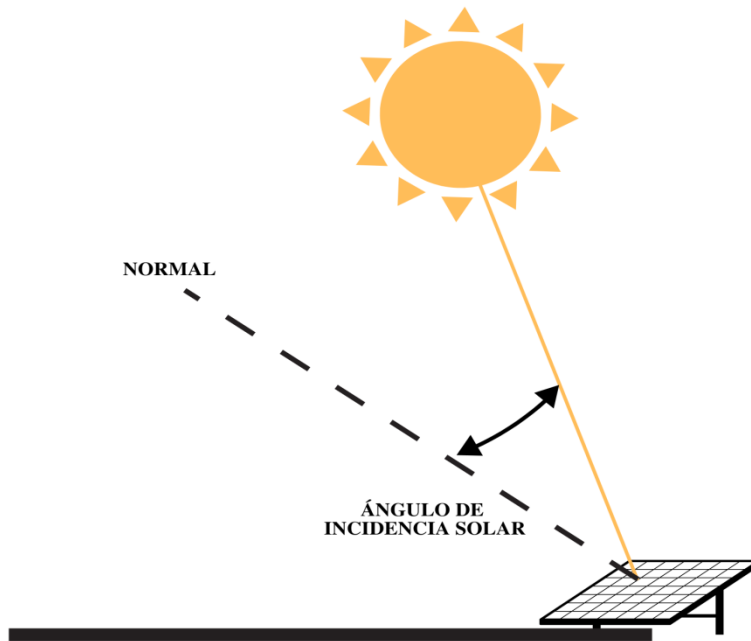


Figura 9. Representación gráfica del ángulo de incidencia solar.

2.2 Tecnología fotovoltaica y sus características.

2.2.1 Curva I-V.

Para representar los valores de potencia que pueda poseer el módulo fotovoltaico a distintas condiciones ambientales se utiliza la curva I-V. La forma característica de curva se obtiene al variar una carga resistiva externa desde cero a “infinito”, es decir de corto circuito a circuito abierto, respectivamente. Para cada valor de carga corresponde un valor de voltaje y de corriente, por lo que al variar la carga se genera un barrido de voltaje-corriente como se muestra en la Figura 10.

Dentro de la curva I-V se manejan los conceptos de *VOC*, *ISC*, *VMPP*, *IMPP* y *PMAX*.

VOC: Voltaje en circuito abierto, el cual es el máximo voltaje que pudiera alcanzar el módulo fotovoltaico y se presenta cuando no hay ninguna carga conectada.

ISC: Corriente de corto circuito, la cual es la corriente eléctrica máxima que podría alcanzar el módulo fotovoltaico en condiciones de corto circuito.

VMPP: Voltaje de máxima potencia, se alcanza cuando el módulo funciona al máximo de su rendimiento

IMPP: Corriente de máxima potencia, se alcanza cuando el módulo funciona al máximo de su rendimiento

P_{MAX}: Potencia máxima que bajo condiciones estándar puede alcanzar el módulo al tener corriente y voltaje máximos [54].

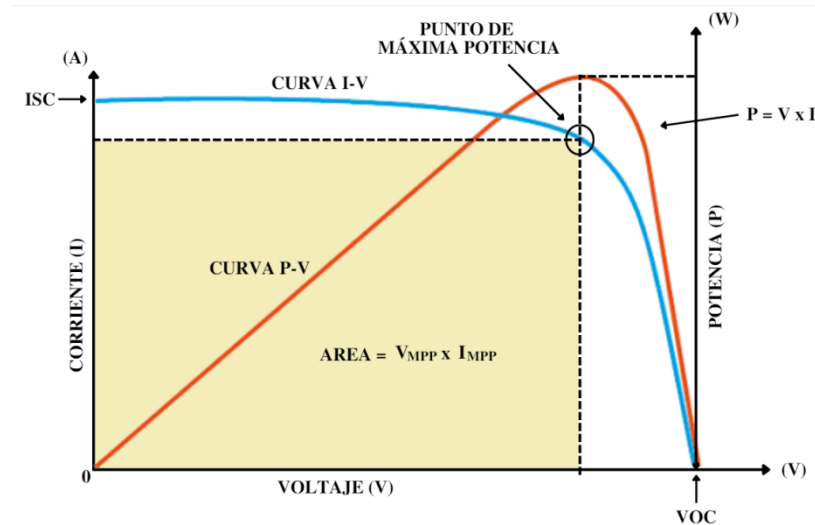


Figura 10. Composición de la curva I-V de un panel solar.

2.2.2 Tipos de tecnología fotovoltaica.

Existen diferentes tipos de celdas en las que se lleva a cabo el fenómeno fotoeléctrico (véase Figura 11); están las de Silicio (monocristalino, policristalino y amorfo) y las que están compuestas de otros tipos de materiales (celdas de película delgada y célula de Arseniuro de Galio Ga As).

Sin embargo, las más utilizadas son las de Silicio monocristalino las cuales tienen una estructura cristalina ordenada, es fabricada con obleas de Silicio y se puede reconocer fácilmente por su monocromía azulada oscura y metálica obteniendo un rendimiento de entre 15 y 18%.

Las células de Silicio policristalinas presentan una estructura ordenada por regiones separadas haciendo que los enlaces irregulares de las fronteras cristalinas disminuyan el rendimiento de la célula dejándola en 12 a 14% y son reconocibles por los cristales en distintos tonos de azul y gris que se puede observar en su superficie. Por otro lado, las de Silicio amorfo caracterizadas por su color marrón; tienen gran desorden en su composición

cristalina, es la célula de Silicio más sencilla y económica de producir, pero con un rendimiento menor al 10%.

Con respecto a las células de película delgada, están compuestas de capas de película delgada sobre un sustrato (vidrio, plástico, metal) y tienen un rendimiento de 5% aproximadamente. Las de Arseniuro de Galio sus costos de producción son bastante elevados, por otro lado, tiene un rendimiento de hasta 27% y mantiene sus características a elevadas temperaturas [55] (véase Figura 12).

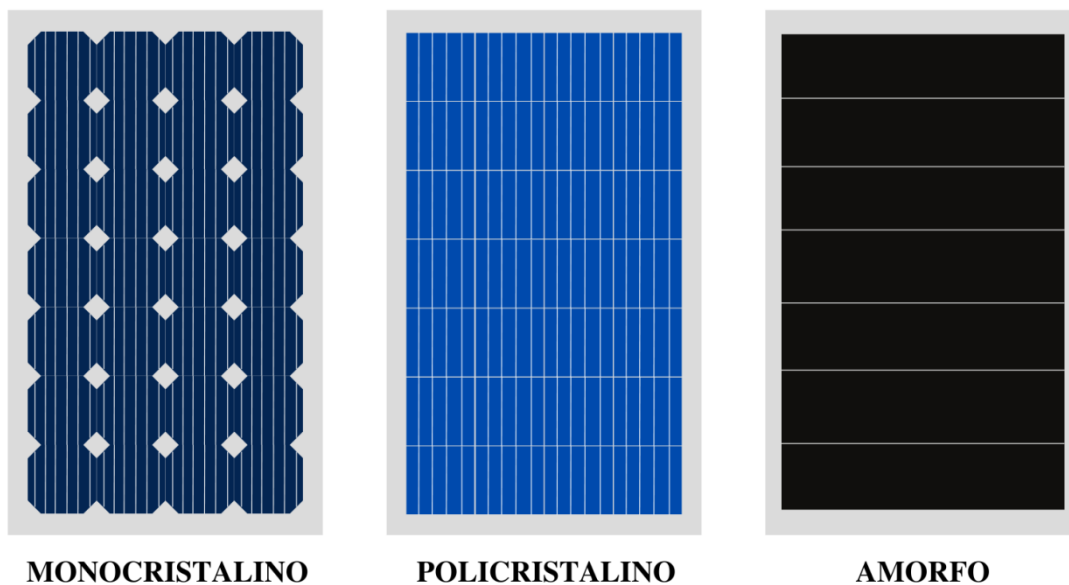


Figura 11. Representación gráfica de paneles solares a base de Silicio.

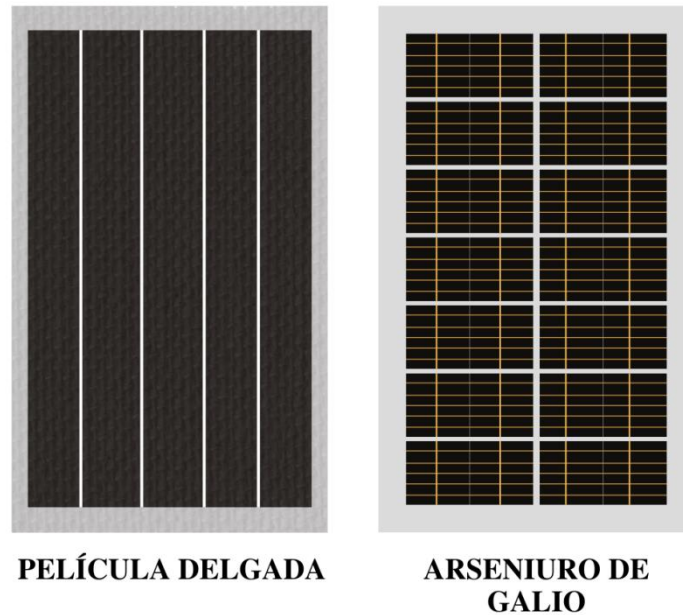


Figura 12. Representación gráfica de paneles solares a base de otros tipos de materiales.

2.2.3 Sistemas fotovoltaicos.

Según Perpiñán Lamigueiro: *“un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar”* [56], por otro lado, David Blas Martínez lo define como *“un sistema forzado por equipos especialmente contruidos para realizar la transformación de la energía solar en energía eléctrica”* [57]. Estos sistemas principalmente son compuestos por módulos fotovoltaicos los cuales a través de sus células mediante el fenómeno fotovoltaico son capaces de transformar la energía del Sol en energía eléctrica de corriente continua. Algunos otros componentes son: equipos de almacenamiento de energía e inversores (Figura 13). Existen diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos: los conectados a la red y los aislados; cada uno tiene sus características y componentes requeridos para su correcto funcionamiento.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red producen la energía para ser integrada directamente a la red convencional. Ya que son conectados directamente a la red, no es necesario contar con ningún tipo de equipos para la acumulación de la energía. Se

componen de módulos fotovoltaicos, inversor para convertir la corriente directa a alterna y el medidor de energía conectada a la red [58] .

Por otro lado, los sistemas fotovoltaicos aislados, la energía que producen no se inyecta a la red, por lo cual es imprescindible hacer uso de un equipo de acumulación de energía (baterías) para almacenar y hacer uso de la potencia producida [56].

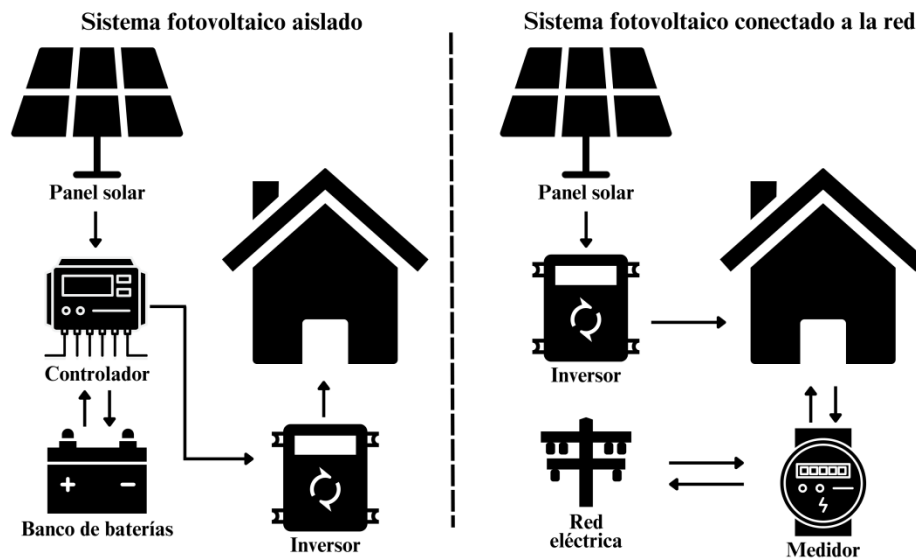


Figura 13. Arquitectura de los tipos de sistemas fotovoltaicos.

2.3 Bombeo de agua fotovoltaico.

2.3.1 Sistemas de bombeo de agua fotovoltaico.

Son aquellos sistemas en los que un sistema fotovoltaico se encarga de alimentar a un sistema de bombeo de agua. Pueden estar equipados con o sin baterías, aunque muchos carecen de ellas ya que el almacenamiento de agua se realiza en depósitos. Por lo tanto, en los casos en que no se incluyan baterías, se aprovechan los periodos de radiación solar para bombear agua hacia los depósitos desde donde se extraerá cuando sea necesaria. Cuando el sistema de bombeo cuenta con baterías, estas acumulan la energía eléctrica para hacer funcionar la bomba en el momento en que se necesite extraer el agua, sin depender de la radiación solar en el momento que no se cuente con el recurso solar. El bombeo solar

representa una de las aplicaciones más comunes de la energía solar fotovoltaica en entornos rurales [59].

Existen tres tipos de alimentación en los sistemas de bombeo: la alimentación fotovoltaica aislada (que se nutre exclusivamente por el sistema fotovoltaico), la alimentación conmutada (que se abastece tanto del sistema fotovoltaico como de la red y/o un generador diésel) y la alimentación híbrida (que recibe simultáneamente corriente alterna de la red eléctrica o un generador y en corriente directa por el sistema fotovoltaico) [60].

2.3.2 Componentes de un sistema de bombeo de agua solar.

1.- Paneles fotovoltaicos: Generan la energía eléctrica con la cual se alimenta al sistema de bombeo.

2.- Controlador de bombeo: Permite el seguimiento del punto de máxima potencia, para maximizar la captación de energía y aumentar la intensidad de corriente generada. Esto ayuda a reducir la tensión, permitiendo que las bombas volumétricas operen de manera constante y eficiente.

3.- Motor: Acciona la bomba.

4.- Bomba de agua: Transforma la energía mecánica en energía hidráulica.

5.- Depósito: Estarán presentes almacenando agua en aquellos sistemas de bombeo directo y sin almacenamiento de energía.

6.- Baterías: Estarán incluidas en los sistemas de bombeo solar que cuenten almacenamiento de energía. Su utilización requiere la instalación de un regulador de voltaje para evitar sobrecargas o descargas que las puedan causar daños.

7.- Inversor: Estará presente en el caso de que el motor funcione con corriente alterna. Sin embargo, existen motobombas que incluyen un inversor dentro de su carcasa.

8.- Tuberías: Transportan el agua a lo largo del sistema.

9.- Válvulas: Pueden clasificarse en accionamiento manual y automático. Su función es controlar la apertura o cierre de las conducciones [59].

2.3.3 Cabeza de un sistema de bombeo de agua fotovoltaico.

Cabeza total o dinámica (H): Es la suma de las cabezas estáticas de descarga y de succión. Representa el aumento total en la carga del flujo a medida que pasa por la bomba.

Cabeza estática de descarga (H_d): Distancia de altura entre el centro de la bomba y la superficie del líquido en el punto de descarga.

Cabeza estática de succión (H_s): Distancia de altura entre la superficie del líquido en la succión y el centro de la bomba.

Cabeza de fricción en la descarga (F_d): Pérdidas por fricción en la línea de descarga.

Cabeza de fricción en la succión (F_s): Pérdidas por fricción en la línea de succión [61] [62] (ver Figura 14).

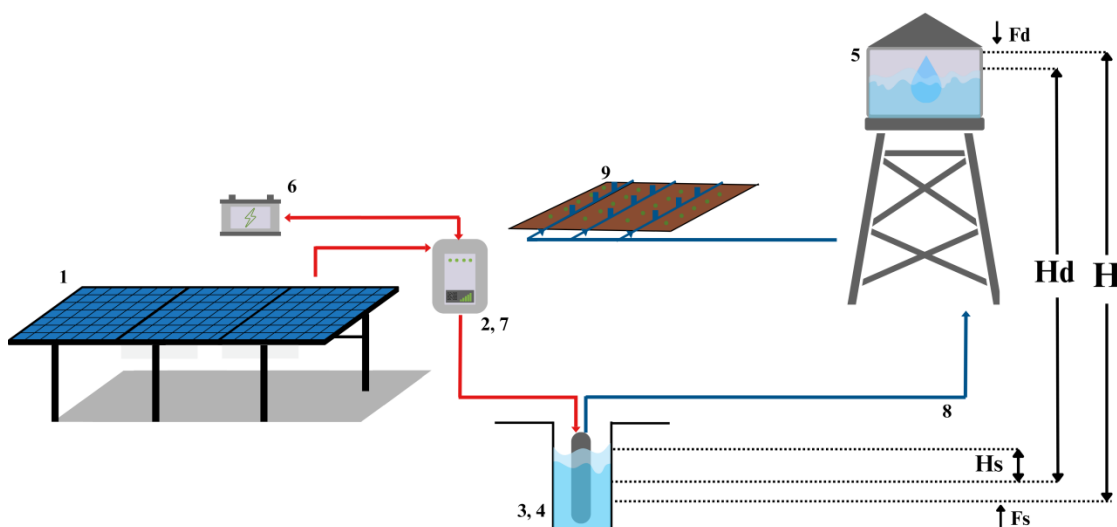


Figura 14. Esquema de un sistema de bombeo de agua solar.

2.4 Características de las plantas y riego.

2.4.1 Etapas de desarrollo de los cultivos.

A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar experimentan cambios gradualmente. El periodo de crecimiento puede dividirse en cuatro etapas: inicial, de desarrollo, de mediados de temporada, de final de temporada (véase Figura 15).

Etapas de desarrollo de los cultivos

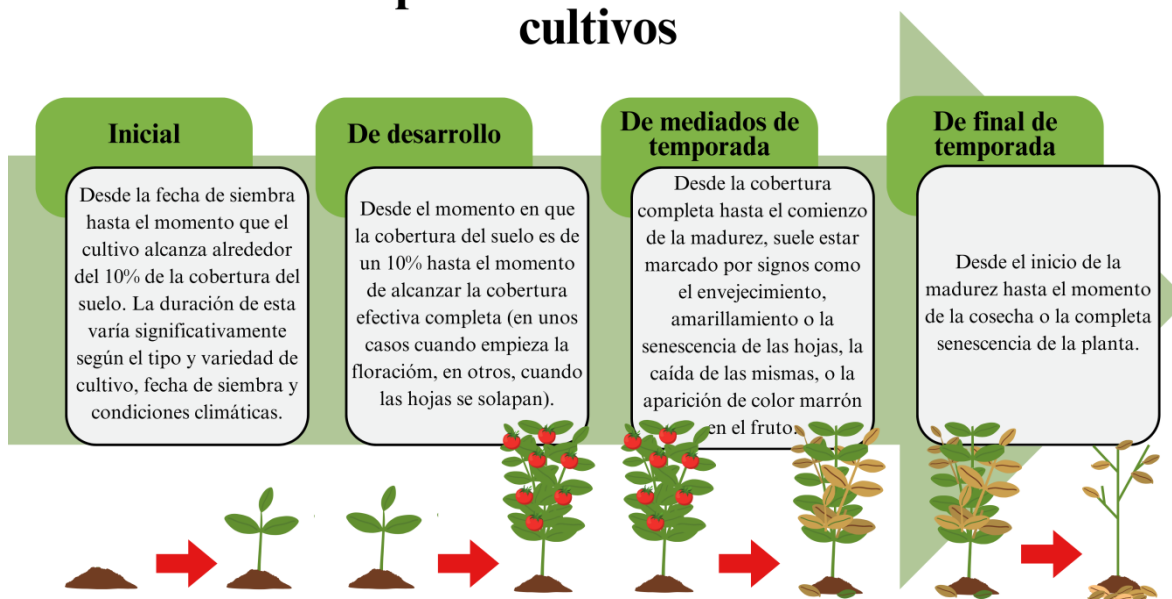


Figura 15. Etapas de desarrollo de los cultivos.

2.4.2 Microclima.

El microclima, que se refiere a las condiciones específicas de temperatura, humedad y atmósfera en el entorno inmediato de un organismo, es determinado por las características de una zona cuya altura es cuatro veces la altura del organismo en cuestión. Los agricultores suelen prestar mayor atención a la temperatura a la hora de ajustarlo y/o aprovechar sus variaciones. Este ambiente, que rodea a la planta en un área de aproximadamente un metro de radio, comprende de los climas a pequeña escala en campos y bosques, colinas y valles, así como otros entornos naturales como áreas de cultivo y asentamientos urbanos. Los microclimas son influenciados por factores como la topografía y las características del terreno, donde el clima local se ve afectado por el tiempo y el espacio, lo que juega un papel crucial en su desarrollo [63] [64] [65].

2.4.3 Evapotranspiración.

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos por los cuales el agua se pierde: evaporación (suelo) y transpiración (cultivo) (Figura 16). Según la FAO Penman-Monteith, se calcula de la siguiente forma (Ecuación (12)):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} v_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 v_2)} \quad (12)$$

Donde:

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²/día)

G = flujo del calor de suelo (MJ/m²/día)

T = temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

v_2 = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

e_s = presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ = constante psicrométrica (kPa/°C)

La evapotranspiración de un cultivo particular se calcula a partir del coeficiente de cultivo (K_c), un parámetro propio de cada cultivo que se ajusta según la etapa de crecimiento correspondiente (Ecuación (13)).

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (13)$$

La evaporación ocurre cuando el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante. Se puede encontrar este proceso en lagos, caminos, suelos y ríos. Para esto, se requiere energía, la radiación directa y la temperatura ambiente del aire (en menor grado) la proporcionan. A medida que va ocurriendo, el aire alrededor se satura poco a poco, y el proceso se ralentiza progresivamente hasta detenerse por completo si el aire húmedo circundante no se transfiere a la atmosfera. La sustitución del aire saturado por uno más seco está fuertemente influenciada por la velocidad de viento. Cuando la superficie donde ocurre es la superficie del suelo, existen otros factores que influyen en el cómo el nivel de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie.

La transpiración consiste en la evaporación del agua líquida almacenada en los tejidos de la planta y su liberación a la atmósfera. Las plantas o cultivos pierden agua principalmente a través de las estomas. La transpiración depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y la velocidad del viento. Por lo tanto, factores como la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y velocidad del viento deben ser tomados en cuenta al considerar el proceso.

Ahora, es importante recalcar que la transpiración y la evaporación en el proceso de evapotranspiración ocurren simultáneamente, por lo cual no hay manera de distinguir entre estos dos procesos. Durante las etapas iniciales, la pérdida de agua ocurre principalmente por evaporación directa del suelo, pero a medida que se va desarrollando y finalmente cubre completamente el suelo, la transpiración pasa a ser el proceso dominante (véase Figura 17) [66].

Evapotranspiración

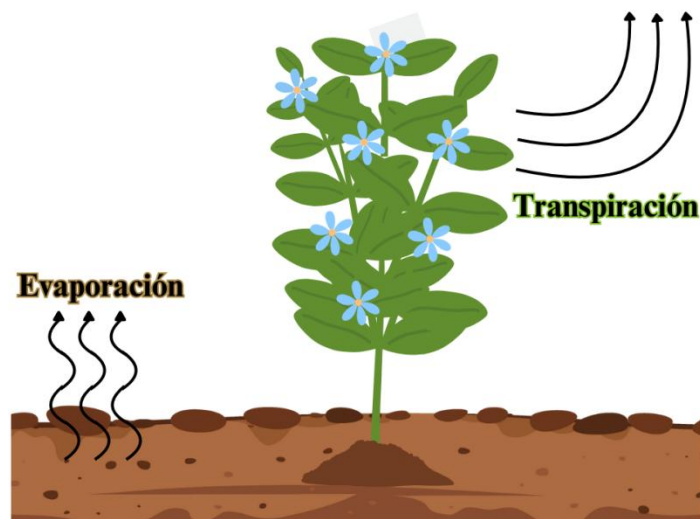


Figura 16. Representación gráfica del proceso de evapotranspiración.

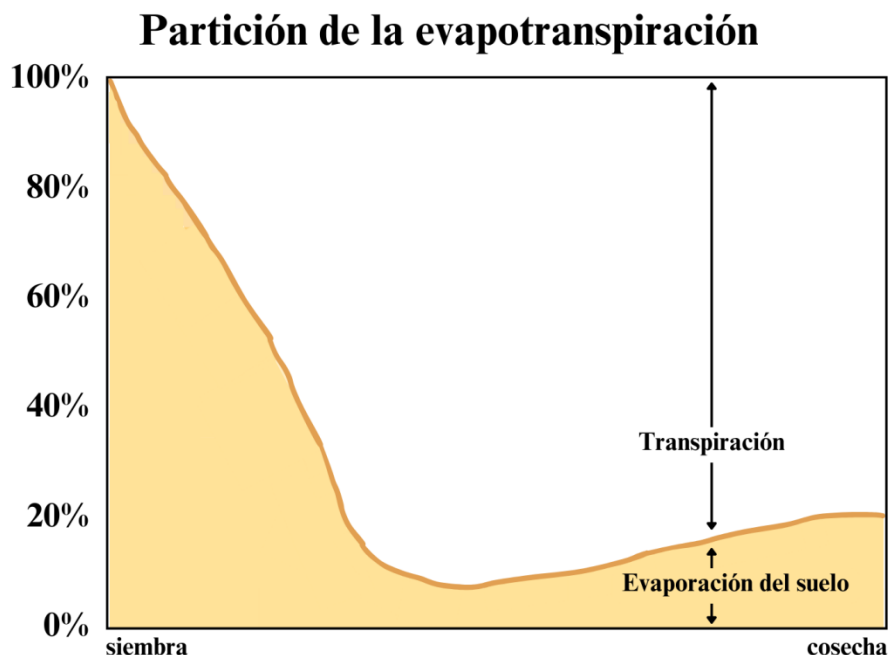


Figura 17. Repartición de la evaporación y transpiración a lo largo del desarrollo de un cultivo.

2.4.4 Riego.

2.4.4.1 Sistemas de irrigación.

Se le denomina sistema de riego a las instalaciones diseñadas para facilitar el riego en cultivos agrícolas. Sus componentes esenciales incluyen:

Cabezal de riego: Es donde se controla el flujo de agua que recorre toda la red de tuberías.

Red de tuberías: Constituye las diferentes ramificaciones del sistema en ella se transporta el agua.

Emisores de riego: Son los dispositivos que distribuyen el agua hacia las plantas de manera controlada; pueden ser boquillas, cintas o aspersores.

2.4.4.2 Tipos de riego.

Los sistemas de irrigación varían en la forma en que distribuyen el agua, entre los métodos más comunes se encuentran:

Riego por gravedad: consiste en la distribución del agua a través de canales o surcos dispuestos a lo largo del área cultivada. Utiliza la fuerza de la gravedad para llevar el agua hacia las plantas.

Riego por superficie: consiste en el uso de grandes caudales de agua, creando inundaciones por manta, donde el agua cubre completamente el terreno, creando grandes piscinas de cultivo.

Riego por goteo: se suministra la cantidad exacta de agua necesaria para cada planta mediante un sistema con goteros, estos aplican pequeñas cantidades de agua directamente a las raíces de las plantas.

Riego por aspersión: el agua se distribuye a la siembra a través de tuberías equipadas con pulverizadores (aspersores) ya sean fijos o móviles, que humedecen el suelo de manera similar a la lluvia llega a la siembra por medio de tuberías y mediante pulverizadores llamados aspersores que humedecen el terreno de forma similar a como lo haría la lluvia [67] [68].

2.5 Fundamentos de agrovoltaica.

2.5.1 Sistemas agrovoltaicos.

Los sistemas agrovoltaicos permiten obtener energía eléctrica y comida en el mismo espacio [10] combinando una instalación fotovoltaica y parcelas agrícolas. Existen dos diferentes configuraciones de altura del sistema fotovoltaico en donde en cada una de ellas se obtiene un resultado distinto (Figura 18):

Distancia baja entre los cultivos y el sistema fotovoltaico: En esta configuración ocurre un beneficio a los cultivos, al sistema fotovoltaico y se aprovecha el espacio. Se coloca el sistema fotovoltaico por encima de los cultivos a tal altura que se crea un microclima con condiciones de temperatura y humedad diferentes a la del medio. Al proyectar sombra sobre los cultivos se puede regular la evapotranspiración y la distribución de la radiación, haciendo un uso más eficiente del agua [69]. Adicionalmente, la evapotranspiración proveniente de los cultivos puede llegar a beneficiar a los módulos fotovoltaicos regulando su temperatura [70].

Distancia alta entre los cultivos y el sistema fotovoltaico: Esto sucede cuando el sistema fotovoltaico tiene una altura lo suficientemente elevada para que no se cree un microclima debajo de los módulos, haciendo que la aplicación del sistema agrovoltaico sea meramente para optimizar el espacio y aprovechar la misma tierra para producción agrícola y de energía [71]. Así mismo, cuando se opta por este tipo de altura, comúnmente es porque se toma en cuenta el paso de maquinaria agrícola [72].

Así mismo, existen distintas configuraciones de posicionamiento de los módulos fotovoltaicos como: posicionamiento vertical (ángulo de 90 respecto al suelo), inclinados, horizontal (completamente acostados sobre la estructura del sistema) y con diferentes densidades (variando el espaciado entre los módulos), todo esto para obtener distintos niveles de radiación sobre los cultivos [73] (Figura 19).

Resultados en las diferentes configuraciones de altura en la estructura de un sistema agrovoltaico

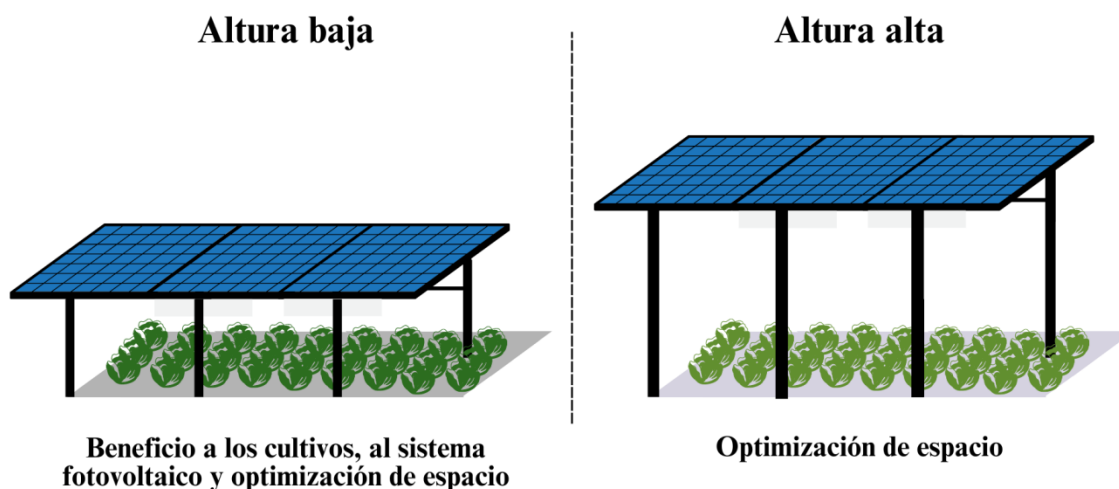


Figura 18. Alturas en la estructura de un sistema agrovoltaico.

Configuraciones de posicionamiento de los módulos en un sistema agrovoltaico

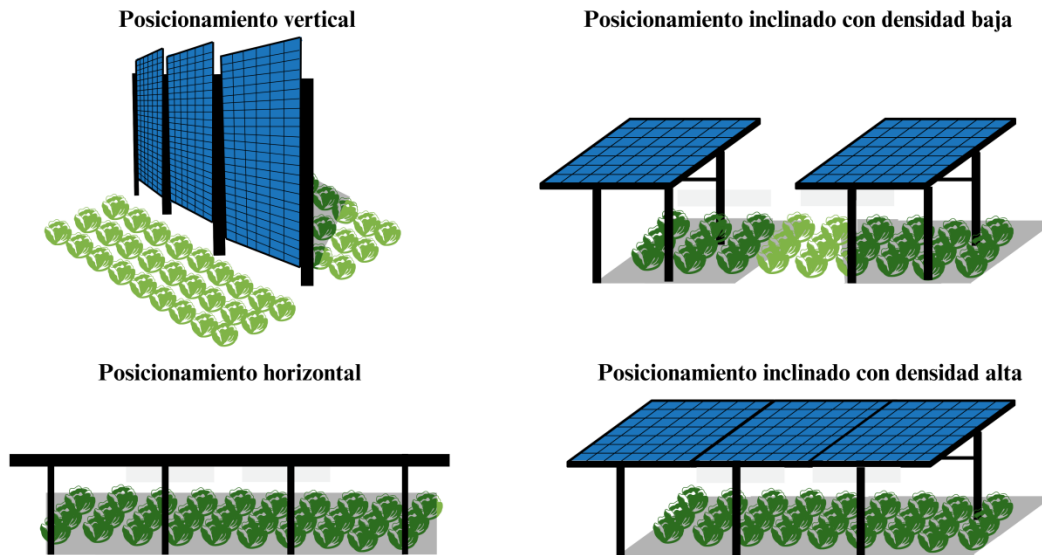


Figura 19. Posicionamiento de los módulos en un sistema agrovoltaico.

2.5.2 Métricas clave en el diseño de sistemas agrovoltaicos.

2.5.2.1 Densidad agrovoltaica

La densidad agrovoltaica se expresa comúnmente a través de la definición de la Relación de Cobertura de Suelo (GCR), definida como la relación entre el área de los módulos fotovoltaicos y el área agrícola disponible [74]. Una densidad agrovoltaica del 100% corresponde al caso en donde la separación entre módulos se vuelve cero y cubre en su totalidad al área del sembradío. La densidad idónea de módulos fotovoltaicos se ajusta según los requerimientos específicos de radiación solar de cada cultivo. Algunas de las densidades agrovoltaicas reportadas por la literatura para cultivos representativos de México se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cultivos representativos de México y la densidad agrovoltaica usada en la literatura.

No.	Cultivo	Densidad agrovoltaica	Referencia
-----	---------	-----------------------	------------

		reportada en la literatura (%)	
1	Maíz	33	[22], [75], [76]
2	Trigo	33	[12], [26], [77]
3	Cebolla	15	[78], [79]
4	Tomate	50	[24], [80]–[82]
5	Brócoli	20	[83]
6	Calabacita	25	[84]
7	Lechuga	35	[12], [20], [85], [86]
8	Zanahoria	32	[18]
9	Berenjena	22	[89]–[91]

2.5.2.2 Distancia de paso entre filas

La distancia que se deja entre las filas de módulos fotovoltaicos repercute de forma directa en la luz que alcanza el suelo y los cultivos: al ensanchar ese intervalo, se reduce el área en sombra y aumenta la irradiancia disponible. Sin embargo, separaciones demasiado amplias también provocan que la luz se distribuya de manera más irregular sobre la parcela, lo cual puede ser un inconveniente en sistemas agrícolas mecanizados e intensivos que requieren una maduración homogénea de los cultivos.

2.5.2.3 Distancia libre vertical

La distancia libre vertical se refiere al espacio que existe entre el suelo y el punto más bajo de las filas de paneles fotovoltaicos, un parámetro crucial en instalaciones elevadas. Dicha distancia se fija, ante todo, en función de la altura potencial de los cultivos y del tamaño de la maquinaria agrícola que operará en la parcela [92].

2.6 Contexto climático y agrícola de México.

2.6.1 Clima en México y la región desértica de Baja California.

Los principales determinantes del clima en México y su diversidad incluyen su gran variación en altitud, su ubicación a ambos lados del Trópico de Cáncer y la influencia oceánica debido a la estrechez de su masa continental. Otros factores secundarios y regionales comprenden la forma geográfica del país, su topografía compleja, la presencia de cordilleras importantes y su ubicación en la parte occidental de Norteamérica. La altitud afecta la presión atmosférica, la disponibilidad de oxígeno, las temperaturas y otros factores importantes para la vida. El Trópico de Cáncer marca una línea significativa en términos de clima y divide la zona árida y semiárida al norte de México de la zona húmeda y semihúmeda al sur, influenciada por los vientos alisios y los ciclones. Las latitudes cercanas al Trópico están estrechamente relacionadas con el patrón de lluvias de verano que prevalece en la mayor parte del país.

La forma geográfica de México, así como la disposición de sus principales cadenas montañosas, desempeñan un papel crucial en la distribución de la humedad y, a menudo, en la temperatura. La presencia de montañas como la Sierra Madre Occidental actúa como una barrera para las masas de aire polar que ingresan desde el norte, afectando el clima en las regiones costeras del Pacífico. Además, la ubicación del noroeste de México en el extremo occidental de Norteamérica contribuye a su aridez, ya que está sujeto a una alta presión durante la mayor parte del año y a la influencia de una corriente marina fría en la costa occidental de Baja California [93].

En el país existen tres tipos de clima con sus respectivas subdivisiones (Figura 20); cálido (húmedo y subhúmedo), templado (húmedo, subhúmedo y semifrío) y seco (seco, semiseco y muy seco). En la Tabla 4 se enlista cada uno junto con sus principales características.



Figura 20. Tipos de clima en México [94].

Tabla 4. Características de los climas en México [5],[6],[7],[8],[9]

CLIMA	CARACTERISTICAS	INTERVALO TERMICO (BAJA VS ALTA)	TEMPERATURA MEDIA ANUAL	HUMEDAD RELATIVA	PRECIPITACION PLUVIAL ANUAL
Cálido húmedo	Temperatura y humedad altas y constantes todo el año.	< 10 °C	22 °C	70 a 99%	1000 mm
Cálido subhúmedo	Cambios diarios de temperatura pequeños; estación de lluvias en verano	4 °C	> 20 °C	60 a 99%	> 800 mm
Templado húmedo	Condiciones ambientales similares en invierno, primavera y verano	5 °C	15 °C	50 a 80%	1000 mm
Templado subhúmedo	Mitad del año caluroso, mitad del año frío.	> 10 °C	< 18 °C	30 a 80%	< 800 mm

Seco y semiseco	Oscilación térmica importante, diaria y anual.	> 10 °C	> 18 °C	30 a 80%	< 600 mm
Muy seco	Amplia variación de temperaturas extremas por baja humedad y alta radiación.	15 °C	> 23 °C	20 a 70%	< 350 mm

En tanto a la región desértica de Baja California, en el estado, un 93% en total, se caracteriza por su clima característico del desierto, compuesto en un 69% por un clima muy seco y en el 24% restante por un clima seco y semiseco (Figura 21). Esta área se distingue por sus veranos intensamente calurosos y sus inviernos templados, manteniendo una temperatura promedio anual de alrededor de 23°C. Las temperaturas más altas, superiores a 30°C, se experimentan de mayo a septiembre, mientras que las más bajas, alrededor de 5°C, se presentan en enero. El Valle de Mexicali, que se encuentra a nivel del mar, soporta las temperaturas más elevadas en todo el país, habiéndose registrado máximas de hasta 45°C durante los meses de julio y agosto.

La cantidad de precipitación es escasa, con un promedio anual de aproximadamente 200 mm. En las costas del Golfo de California, se registra la menor cantidad de lluvia en México, situándose en torno a los 40 mm anuales, convirtiéndola en la región más árida del país. El municipio de Mexicali cuenta con uno de los registros de precipitación anual más bajos de todo México, siendo inferior a 50 mm. [95], [96].



Figura 21. Tipos de clima en Baja California.

2.6.2 Agricultura en México y la región desértica de Baja California.

La agricultura es una actividad fundamental que involucra el cultivo y la producción de una amplia variedad de plantas, semillas y frutos con el propósito de satisfacer diversas necesidades humanas y ganaderas, así como proporcionar materias primas a diversas industrias [97]. Esta práctica desempeña un papel crucial en la provisión de alimentos para la población humana, ya que la mayoría de los alimentos que consumimos provienen de cultivos agrícolas. Además, la agricultura es esencial para la alimentación del ganado, que a su vez es una fuente de carne, leche y otros productos derivados que también forman parte de la dieta humana.

México es responsable del cultivo de una gran variedad de especies por su diversidad de climas. Los principales estados en cuanto a producción agrícola son Jalisco, Veracruz, Oaxaca, Chihuahua y Sinaloa. En conjunto emplean a 1,491,864 personas en esta industria. Estos estados generan un total de 114,024,954 toneladas de productos agrícolas, cultivados en un área combinada de 6,512,626 hectáreas a lo largo de diversos ciclos de cultivo. En la

Tabla 5 se enlista el volumen de producción por cada entidad y los productos agrícolas que en mayor cantidad produce cada uno de ellos [98].

Tabla 5. Volumen de producción y productos agrícolas principales por entidad destacada en agricultura.

ESTADO	PRODUCCIÓN AGRÍCOLA (TON)	
Jalisco	Volumen de producción 35,539,638	
	Pastos 13,194,479	Caña de azúcar 8,013,662
Veracruz	Volumen de producción 30,071,966	
	Naranja 2,486,956	Caña de azúcar 21,837,516
Oaxaca	Volumen de producción 19,337,368	
	Pastos 12,742,818	Caña de azúcar 3,929,301
Chihuahua	Volumen de producción 16,516,499	
	Maíz grano 1,417,390	Alfalfa 8,116,222
Sinaloa	Volumen de producción 12,559,483	
	Maíz grano 6,440,205	Jitomate 764,435

La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) ha subdividido el territorio de México en unidades geográficas (Figura 22) con el propósito de identificar de manera más sencilla las capacidades productivas de cada área. Esto se hace con la intención de aprovechar de manera efectiva los recursos de tierras, agua y mano de obra para la generación de alimentos e insumos agrícolas en cinco regiones diferentes (Noroeste, Noreste, Centro-Occidente, Centro y Sur-Sureste), tanto en términos de agricultura, ganadería y pesca, al mismo tiempo que se promueve la preservación del medio ambiente y el bienestar de la población local. En este estudio, se analizarán las características relacionadas con la producción de alimentos e insumos. A continuación, se enlistan y mencionan sus principales características (Tabla 6) [99].

Tabla 6. Regiones agroalimentarias de México.

REGIÓN	ENTIDADES QUE LA CONFORMAN	PRODUCCIÓN AGRÍCOLA (TONELADAS)	VALOR DE SU PRODUCCIÓN AGRÍCOLA (MDP)	PRINCIPAL PRODUCTO PRODUCIDO
Noroeste	Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit	32,698,813	147,740	Maíz grano
Noreste	Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas y Zacatecas	50,237,983	106,260	Maíz grano
Centro-Occidente	Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Querétaro y San Luis Potosí.	75,086,363	238,467	Aguacate
Centro	Ciudad de México, Estado de México, Guerrero, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala.	32,387,496	79,637	Maíz grano
Sur-Sureste	Campeche, Chiapas, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán.	72,054,283	103,263	Caña de azúcar



Figura 22. Regiones agroalimentarias de México.

Baja California corresponde a la región noroeste agroalimentaria del país el cual su principal producto es el maíz blanco.

En la zona desértica de Baja California desarrollan cuatro modalidades de producción agrícola, divididas en dos de riego y dos de cultivos temporales. La primera variante de agricultura con riego se localiza en áreas como la llanura costera con lomeríos (Los Pinos), valles intermontanos, pisos de valle y partes limitadas de las sierras bajas. Estos cultivos se cultivan en suelos profundos con niveles moderados o altos de fertilidad, pendientes menores al 4%, salinidad mínima o leve, y prácticamente sin erosión. Se obtiene agua de pozos profundos y generalmente se distribuye a través de sistemas de gravedad o aspersión, aunque ocasionalmente se utiliza el riego por goteo, como en el caso del tomate. Los cultivos, tanto anuales como perennes, se destinan principalmente a los mercados regionales, nacionales y extranjeros e incluyen productos como habas, sandías, melones, lechugas, coles, membrillos, limones, nueces, almendras, tomates, cebada, trigo, papas, maíz, frijoles, sorgo, alfalfa, zanahorias y coles de Bruselas.

En cuanto a las modalidades de agricultura temporal, se desarrollan en áreas caracterizadas por lluvias escasas, lo que resulta en cosechas irregulares y rendimientos bajos. La primera modalidad abarca áreas en sistemas topográficos de lomeríos ramificados con cañadas, ciénegas, la gran llanura elevada con lomeríos y los valles intermontanos. Estos suelos son relativamente profundos, moderadamente fértiles y levemente salinos, con pendientes menores al 6%. La labranza es mecanizada, y los productores no utilizan fertilizantes ni pesticidas en sus cultivos, que están destinados al comercio regional o al autoconsumo. Esto resulta en cosechas de cebada que oscilan entre 1,500 y 3,000 kg por hectárea y entre 1,500 y 2,000 kg de trigo, además de otros cultivos como avena, maíz, frijoles, garbanzos, chícharos y habas.

La última modalidad de producción agrícola se encuentra en áreas con suelos de profundidad media o profunda, pendientes menores al 6%, con un riesgo moderado de erosión y poco pedregosos. Estos suelos se encuentran en sistemas topográficos como mesetas basálticas, lomeríos con bajadas, sierras bajas complejas y mesetas bajas. Aquí, la labranza se realiza de manera mecanizada, y los productores no emplean fertilizantes ni

pesticidas. Los cultivos incluyen 1,000 kg de cebada por hectárea, así como cosechas limitadas de trigo, avena, maíz, frijoles, sandías, vid y olivo, todos destinados al comercio regional y al autoconsumo [100].

El Valle de Mexicali se distingue por su actividad agrícola, que se divide en dos subciclos: primavera-verano y otoño-invierno. Además, se producen cultivos perennes en esta región. En el Valle de Mexicali, se siembran diversos productos como algodón, sorgo, maíz, ajonjolí, calabacita, cebollín, chile, melón, pepino, perejil, sandía, tomate, aceite de cártamo, cebada, trigo, acelga, ajo, betabel, brócoli, cebolla, coliflor, chícharo, nabo, ejote, espinaca, lechuga, rábano, repollo, zanahoria, alfalfa, vid y espárrago [101].

Capítulo III

METODOLOGÍA



*“Soy un gran creyente en la suerte y
descubro que cuanto más trabajo, más
suerte tengo.”*

- Thomas Jefferson.

3.1 Alcances del proyecto.

La metodología integra el nexo agua-energía-alimento, articulando la generación fotovoltaica, el bombeo y almacenamiento hídrico, almacenamiento eléctrico y los requerimientos de riego asociados al cultivo bajo el arreglo agrovoltaico.

En primer lugar, se caracteriza el caso de estudio del Ejido Laguna Salada mediante la descripción de sus condiciones geográficas, climáticas, prácticas agrícolas y de infraestructura hídrico-energética (Sección 3.2). Con base en ello, se plantea la propuesta de estudio como un sistema agrovoltaico integral, definiendo su configuración física y su lógica de operación a nivel de subsistemas (Sección 3.3). Posteriormente, se desarrolla un modelo matemático que representa el comportamiento de la propuesta de estudio e incorpora: datos provenientes de un archivo climatológico y geometría solar; estimación de irradiancia y potencia del sistema agrovoltaico; un modelo de sombras para la distribución de radiación bajo el arreglo; el cálculo de evapotranspiración y requerimientos de riego; desempeño del bombeo mediante curvas caudal-eficiencia interpoladas a partir de la ficha técnica; el tanque de almacenamiento y módulo de irrigación; así como la gestión energética de una microrred mediante un gestor con baterías, conversión por inversor y respaldo con generador diésel cuando sea necesario (Sección 3.4).

A partir de este modelo, se define la configuración y ejecución de la simulación, incluyendo entradas, parámetros y el flujo de cálculo para evaluar el desempeño bajo condiciones locales (Sección 3.5). El modelo y los procesos principales se validan mediante evidencia experimental a escala de pilotaje y, cuando corresponde, mediante parámetros y curvas reportadas en la literatura y fichas técnicas; en este marco, se establece el diseño experimental del pilotaje para la validación de componentes clave (Sección 3.6). Finalmente, el modelo se integra como herramienta de análisis para formular y aplicar un método integral de dimensionamiento orientado a zonas aisladas, el cual se aplica al caso de estudio para explorar configuraciones y estimar su potencial técnico bajo las condiciones del Ejido Laguna Salada (Sección 3.7).

Bajo las consideraciones adoptadas en este trabajo, los efectos microclimáticos se incorporan mediante el cálculo de evapotranspiración, sin representar explícitamente variables termo-higrométricas bajo el arreglo (temperatura y humedad del aire y del suelo), ni la dinámica del flujo de aire, convección y ventilación natural. Asimismo, el componente agrícola se representa a través de la evapotranspiración y los requerimientos de riego, sin incorporar un modelo fisiológico de respuesta del cultivo (biomasa o rendimiento) ante cambios en la radiación. En el componente hidráulico, la red de distribución se modela a nivel funcional, sin considerar pérdidas por fricción, pérdidas de carga, transitorios ni un dimensionamiento de tuberías. Por ello, los resultados deben entenderse como una evaluación operativa-energética del sistema y una herramienta para comparar configuraciones y estimar el desempeño del sistema bajo un enfoque replicable para comunidades aisladas, más que como un diseño constructivo de detalle. La secuencia general de la metodología se resume en la Figura 23, donde se muestra el flujo desde la caracterización del caso de estudio hasta el dimensionamiento de la propuesta para su implementación.

Metodología de la investigación

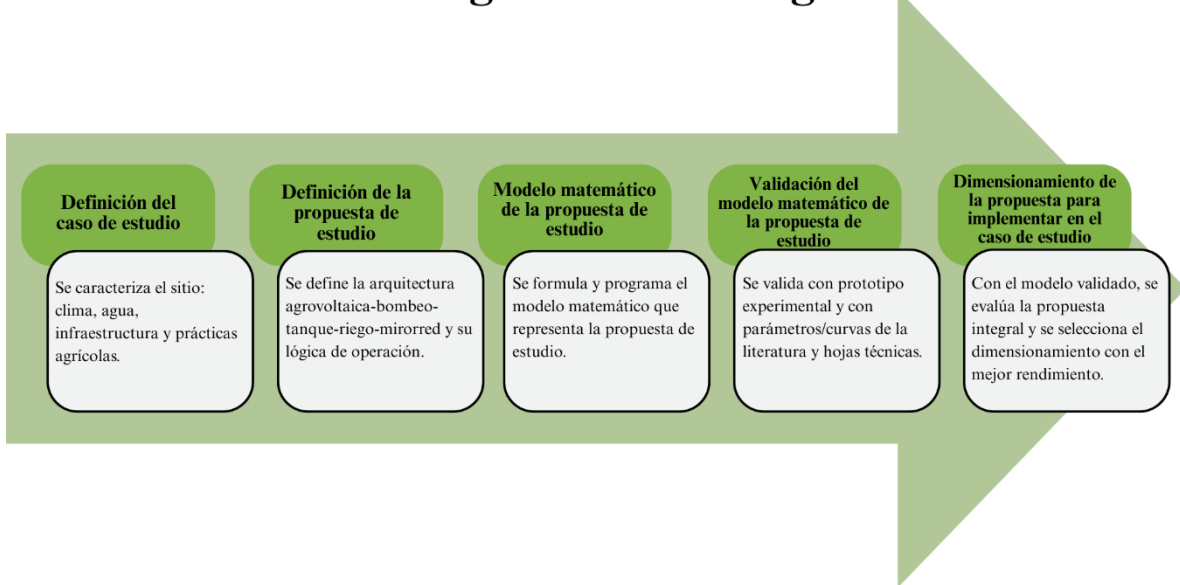


Figura 23. Secuencia de la metodología de la investigación.

3.2 Caso de estudio: Ejido Laguna Salada.

El Ejido Laguna Salada se selecciona como caso de estudio por combinar un alto recurso solar y condiciones áridas que vuelven crítico el manejo del agua, con la existencia de infraestructura fotovoltaica de bombeo ya instalada pero subutilizada. Este contraste permite analizar cómo una transición hacia un esquema agrovoltaico puede aumentar el aprovechamiento del sistema (bombeo más continuo y potenciales usos productivos bajo los módulos fotovoltaicos), y ampliar los beneficios comunitarios más allá del riego puntual. Las características del sitio y del sistema existente se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Síntesis del sitio de estudio e infraestructura hídrico-energética existente (Ejido Laguna Salada).

Categoría	Variable	Valor/descripción
Ubicación	Región	Extremo occidental del valle de Mexicali
	Coordenadas	32°10'45.3"N 115°39'46.2"O
	Topografía	Planicie sin obstáculos orográficos significativos (ver Figura 24)
Clima [102] y recurso solar	Tipo de clima	Seco cálido muy seco
	Temperatura media anual	23°C
	Temperatura en invierno	9°C - 20°C
	Temperatura en verano	15°C - 35°C
	Extremos	> 47°C y < 1°C
	Radiación (GHI)	5.5 kWh/m ² día
	Horas de sol	>3500 h/año
Suelo [100]	Tipos dominantes	Regosoles y arenosoles
	Textura	Franco-arenosa a arenosa

	Implicación	Baja retención de humedad → riegos frecuentes
Agua [103]	Fuente	Acuífero local
	Concesión	01BCA102014/04IMDA18
	Volumen autorizado	240,000 m ³ al año
	Pozo (nivel estático)	Profundidad variable: 15-70 m
Uso agrícola	Superficie “Huertos Familiares”	52.8 ha
	Superficie actualmente cultivada	1.58 ha (palma datilera)
	Resto del terreno	Subutilizado
	Interés local	Diversificación: maíz, trigo y hortalizas de ciclo corto
Infraestructura FV-bombeo	Potencia FV instalada	78.72 kWp
	Módulos	192 SunPower de 410 W
	Inclinación / orientación	20° / Sur
	Controlador-inversor	Lorentz 68 kW
	Bomba	Centrifuga 55 kW
Operación actual	Tiempo de operación	≈3 h/día
	Limitantes	Sin almacenamiento hídrico; sin aprovechamiento energético adicional
Implicación	Oportunidad	Reconfigurar como esquema agrovoltaico integral (electricidad + bombeo +



Figura 24. Imagen satelital del ejido Laguna Salada.

3.3 Propuesta de estudio: sistema agrovoltaico integral.

La propuesta que se presenta en esta sección integra varios subsistemas con el objetivo de impulsar una mejora significativa en las prácticas agrícolas en el sitio de estudio seleccionado: el Ejido Laguna Salada, ubicado en la región desértica de Baja California.

La combinación de factores como altas temperaturas, escasas precipitaciones y suelos de baja fertilidad ha planteado desafíos considerables para los agricultores en la región desértica de Baja California. En un entorno donde la agricultura tradicional puede ser insostenible, es crucial explorar y adoptar alternativas para garantizar la seguridad alimentaria y el bienestar económico de las poblaciones que albergan esta área. Al integrar

sistemas adaptados a estas condiciones únicas, podemos optimizar la producción agrícola y aumentar la resiliencia de la comunidad agrícola frente a los desafíos ambientales.

3.3.1 Descripción física.

La propuesta tecnológica presentada en la Figura 25 consiste en un sistema agrovoltaico con bombeo de agua subterránea orientado al riego de cultivos y al abastecimiento de agua para consumo humano, así como al suministro energético para cargas comunitarias del ejido Laguna Salada, en Baja California. A continuación, se describen los subsistemas que integran la propuesta.

1. **Sistema agrovoltaico:** Arreglo fotovoltaico elevado, instalado sobre el área de cultivo para permitir el uso dual del suelo. La elevación y geometría del arreglo generan sombreado parcial sobre el cultivo y un microclima bajo los módulos fotovoltaicos con menor exposición directa a la radiación, lo que puede favorecer condiciones sus condiciones (reducción de la temperatura del aire y del suelo y disminución de la radiación directa incidente), lo cual puede reducir la evapotranspiración y, por tanto, la demanda hídrica de los cultivos en condiciones desérticas. La estructura se concibe para resistir las condiciones ambientales del sitio como, alta irradiancia y temperaturas extremas.
2. **Controlador y bomba sumergible del sistema de bombeo:** Subsistema compuesto por un controlador de bombeo instalado en superficie y una bomba sumergible ubicada en el pozo. El controlador se conecta eléctricamente al sistema fotovoltaico y a la bomba mediante cableado de potencia y protecciones. La bomba descarga el agua extraída hacia el tanque de almacenamiento a través de la conducción hidráulica correspondiente.
3. **Tanque de almacenamiento:** Depósito propuesto en configuración elevada para facilitar la distribución por gravedad. Su capacidad y dimensiones se seleccionan en función de los requerimientos del sitio y de la estrategia de operación del sistema.
4. **Sistema de irrigación:** Conjunto de elementos de distribución que conducen el agua desde el pozo o desde el de almacenamiento hasta el área de cultivo.

5. **Controlador de carga:** Equipo de gestión de almacenamiento eléctrico instalado para administrar la transferencia de energía entre el banco de baterías y la demanda de energía eléctrica del poblado.
6. **Banco de baterías:** Conjunto de baterías interconectadas (serie/paralelo) que forman el sistema de almacenamiento eléctrico. Se ubica en un espacio protegido y ventilado, con conexiones de potencia hacia el controlador de carga y hacia el inversor.
7. **Inversor:** Equipo instalado en el tablero del sistema que convierte corriente directa a corriente alterna para alimentar las cargas eléctricas consideradas.
8. **Generador auxiliar diésel:** Se propone un generador diésel que se incorpora como fuente auxiliar interconectada al sistema según sea necesario para satisfacer la demanda.

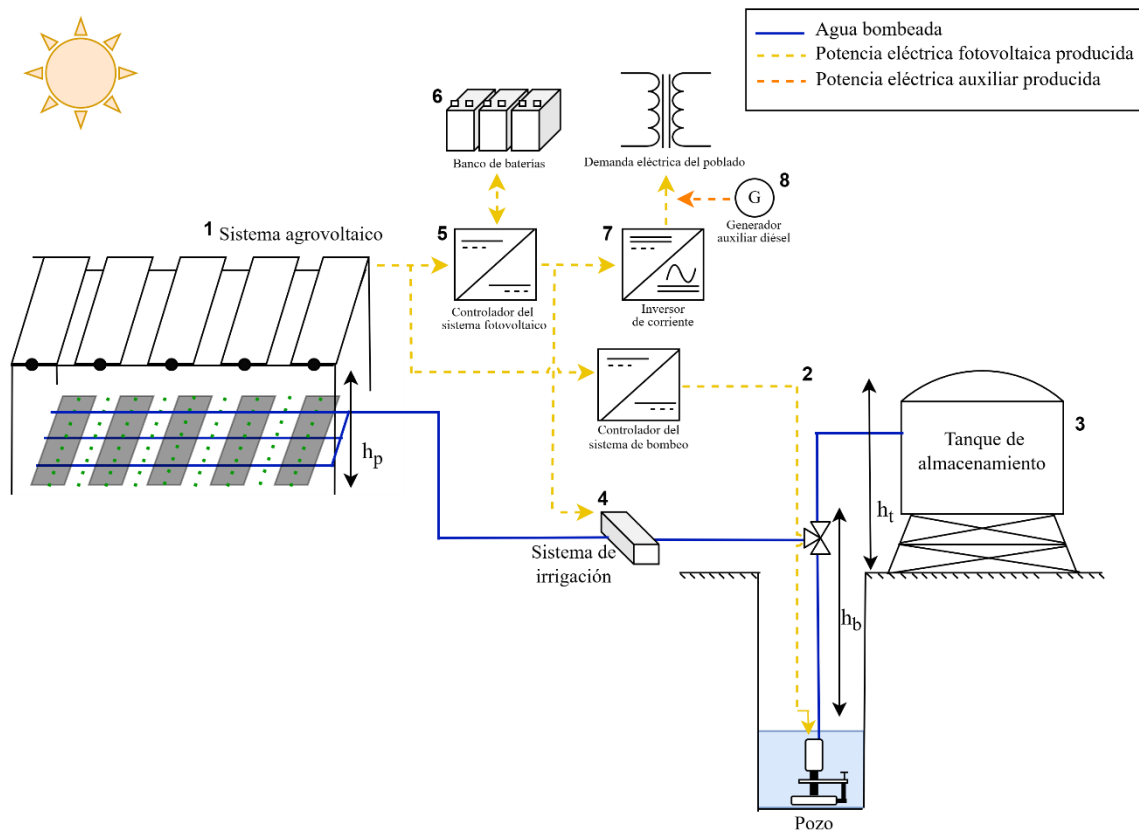


Figura 25. Diagrama de la propuesta de estudio.

3.3.2 Descripción operativa.

El sistema opera mediante dos flujos principales: la energía eléctrica generada por el arreglo agrovoltaico y el agua subterránea extraída mediante bombeo, la cual se gestiona para mantener un volumen almacenado en el tanque y atender el riego por conducción hacia el sistema de irrigación.

El sistema agrovoltaico (1) genera energía en corriente directa (CD) a partir de la irradiancia disponible. Esta energía alimenta el controlador del sistema de bombeo, el cual acciona la bomba sumergible (2) para extraer agua subterránea.

En la operación cotidiana, el caudal bombeado se conduce inicialmente al tanque de almacenamiento (3) con el fin de llenarlo o reponerlo hasta un nivel operativo. Este tanque funciona como reserva hídrica para el ejido, destinada tanto a consumo humano como a riego en contingencia (por ejemplo, cuando la irradiancia es baja o el bombeo directo no es suficiente).

Una vez que el tanque alcanza el nivel requerido, el caudal de bombeo se dirige hacia el sistema de irrigación (4) para el riego de los cultivos. En esta etapa, el riego se realiza principalmente por bombeo directo, y la entrega de agua al cultivo se ejecuta conforme al esquema de aplicación adoptado.

En cuanto al suministro eléctrico, la energía generada por el arreglo fotovoltaico se gestiona mediante el controlador de carga (5) y el banco de baterías (6). En condiciones de excedente, parte de la energía se almacena para cubrir periodos de baja generación o demanda fuera de la ventana solar. La energía disponible en CD (proveniente del sistema agrovoltaico y/o del banco de baterías) se entrega al inversor (7), el cual la convierte a corriente alterna (CA) para alimentar las cargas eléctricas comunitarias consideradas.

Finalmente, el generador auxiliar diésel (8) opera como respaldo energético y se incorpora cuando la generación fotovoltaica y el almacenamiento eléctrico no son suficientes para satisfacer la demanda requerida, asegurando continuidad de servicio.

3.4 Modelo matemático.

3.4.1 Producción de energía fotovoltaica del sistema agrovoltaico.

3.4.1.1 Energía solar disponible.

En esta etapa se obtiene información acerca de la trayectoria solar y la forma en la que los rayos se comportan al incidir sobre la superficie de la Tierra a través de la geometría solar. Tal como se vio en la sección 2.1.3 Geometría solar., se utilizan las ecuaciones de geometría solar.

3.4.1.2 Cálculos para el área de apertura efectiva.

El cálculo del ángulo de incidencia que ayudará a determinar si el sistema está posicionado de manera normal a los rayos del Sol. Para el cual se deben de calcular las componentes de la posición del módulo y las componentes solares.

$$X_{ref} = \cos(\alpha_s) \text{sen}(\gamma_s) \quad (14)$$

$$Y_{ref} = \cos(\alpha_s) \text{cos}(\gamma_s) \quad (15)$$

$$Z_{ref} = \text{sen}(\alpha_s) \quad (16)$$

Las componentes de la posición del módulo fotovoltaico se calculan de la siguiente forma.

$$\varphi = 90 - \beta \quad (17)$$

$$H1_s = H1 - \text{cos}(\varphi) \quad (18)$$

$$Z_{modulo} = H1_s \text{sen}(\varphi) \quad (19)$$

$$Y_{modulo} = H1_s \text{cos}(\varphi) \quad (20)$$

$$X_{modulo} = \sqrt{H1^2 - Z_{posición}^2 - Y_{posición}^2} \quad (21)$$

En donde φ es el ángulo de la posición actual del sistema, donde tiene un valor de cero.

Una vez teniendo las componentes solares y de la posición del módulo se calcula el ángulo de incidencia haciendo uso del producto cruz.

$$A = (X_{modulo} , Y_{modulo} , Z_{modulo}) \quad (22)$$

$$B = (X_{ref} , Y_{ref} , Z_{ref}) \quad (23)$$

$$C = A \times B \quad (24)$$

$$\theta_i = \text{sen}^{-1} \left(\frac{C}{AB} \right) \quad (25)$$

3.4.1.3 Conversión de energía.

Aquí se toman en cuenta las características físicas que influyen en la conversión de recurso solar a potencia eléctrica dentro del módulo fotovoltaico. Dentro de la ficha técnica de los módulos fotovoltaicos los fabricantes aseguran cierta eficiencia de operación según los años de antigüedad del módulo. El factor de pérdida de eficiencia por degradación se delimita por:

$$Fct_{degr} = \begin{cases} 0.975, & \text{si antigüedad} \leq 1 \\ 0.975 - (\text{antigüedad} * 0.005) + 0.005, & \text{si antigüedad} \geq 2 \end{cases} \quad (26)$$

Un punto que también se toma en cuenta para la conversión de energía es la temperatura de celda ya que el calor es una variable que puede llegar a afectar negativamente al rendimiento de las celdas en un módulo fotovoltaico. Para el cálculo, los fabricantes nos proporcionan en la ficha técnica los coeficientes de temperatura que nos ayudarán a calcular el VOC , ISC y $Pmax$ según sea la temperatura de las celdas del módulo. Para lo que primero se calcula la temperatura de celda que se tiene en el instante que se hace el análisis:

$$T_{celda} = \frac{T_{amb} + (T_{celda_{NOCT}} - T_{amb_{NOCT}})}{I_{b_{NOCT}}} * I_b \quad (27)$$

En donde la $T_{amb_{NOCT}}$ tiene un valor de $20^{\circ}C$, $I_{b_{NOCT}}$ corresponde a $800 W/m^2$ y $T_{celda_{NOCT}}$ a $45^{\circ}C$, todas medidas según condiciones de prueba NOCT de los módulos fotovoltaicos.

Una vez obtenida la temperatura de celda del sitio se debe saber qué tanto difieren cada uno de los parámetros eléctricos (VOC , ISC y $Pmax$) en porcentaje según la temperatura de celda que tenga.

$$\Delta Pmax = (Cff_{T_{Pmax}}) * (Tcelda - Tcelda_{STC}) \quad (28)$$

En donde $Tcelda_{STC}$ tiene un valor de $25^{\circ}C$ y teniendo el delta podemos calcular el valor real del parámetro según indica la ecuación (29). El mismo procedimiento puede ser utilizado para el cálculo del valor real según la temperatura de celda del VOC y del ISC .

$$Pmax_{cal} = \frac{(100\% + \Delta Pmax) * Pmax_{STC}}{100\%} \quad (29)$$

Para el cálculo de la potencia máxima actual $Pmax_{actual}$ definimos los parámetros de la potencia interceptada en el panel ($P_{Intercep}$) y la potencia interceptada a parámetros STC ($P_{In_{STC}}$).

$$P_{Intercep} = Ib * Area * Pcos \quad (30)$$

$$P_{In_{STC}} = Ib_{STC} * Area \quad (31)$$

$$Eff_{STC} = \frac{Pmax_{cal}}{P_{In_{STC}}} * Fct_{degr} \quad (32)$$

$$Pmax_{actual} = P_{Intercep} * Eff_{STC} \quad (33)$$

3.4.1.4 Cálculo de potencia generada por el sistema fotovoltaico.

Por último, se calcula la potencia generada por el sistema fotovoltaico.

$$P_{in} = Ib * Area * Pcos * IAM \quad (34)$$

$$P_{celda} = Eff_{STC} \quad (35)$$

$$P_{sistema} = P_{in} * P_{celda} * NumModulos \quad (36)$$

3.4.2 Modelo de sombras.

3.4.2.1 Cálculo del sombreado.

Para estimar el sombreado instantáneo se proyecta en el plano del campo (matriz) la sombra del módulo fotovoltaico, representándola como un paralelogramo definido por las proyecciones de sus cuatro vértices (V_A, V_B, V_C y V_D) y su centro

A partir de la longitud del módulo en el eje y como L_y, p y la inclinación β se calcula la proyección en planta de esa longitud.

$$L_y = L_{y,p} \cos(\beta) \quad (37)$$

Luego, considera que la inclinación genera un diferencial de altura entre los vértices del módulo. A partir de la altura media h_{centro} , se asigna alturas a los vértices.

$$h_{VA} = h_{centro} + \frac{L_y \text{sen}(\beta)}{2} \quad (38)$$

$$h_{VB} = h_{centro} + \frac{L_y \text{sen}(\beta)}{2} \quad (39)$$

$$h_{VC} = h_{centro} - \frac{L_y \text{sen}(\beta)}{2} \quad (40)$$

$$h_{VD} = h_{centro} - \frac{L_y \text{sen}(\beta)}{2} \quad (41)$$

La dirección de la sombra se toma como el acimut opuesto al del Sol (+180° o -180°).

$$\gamma_{sha} = \begin{cases} \gamma_s - 180, & \text{si } \gamma_s \geq 0 \\ \gamma_s + 180, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (42)$$

Con la altura solar (α_s) se calcula la distancia horizontal de la sombra del punto a altura h_{centro} .

$$Hip_{sha} = \frac{h_{centro}}{\sin(\alpha_s)} \quad (43)$$

$$R_{sha} = Hip_{sha} * \cos(\alpha_s) \quad (44)$$

Descomposición en ejes del campo:

$$x_{sha_rel} = R_{sha} * \sin(\gamma_{sha}) \quad (45)$$

$$y_{sha_rel} = R_{sha} * \cos(\gamma_{sha}) \quad (46)$$

Finalmente se convierte a coordenadas absolutas dentro del campo.

$$x_{sha_abs} = Field_{centrox} - (x_{sha_rel}) \quad (47)$$

$$y_{sha_abs} = Field_{centroy} - (y_{sha_rel}) \quad (48)$$

Posteriormente se procede a hacer el cálculo de la proyección de la sombra de los vértices, donde los cuatro se calculan de la misma forma.

$$H_{sha} = \frac{h_v}{\sin(\alpha_s)} \quad (49)$$

$$R_{sha} = H_{sha} * \cos(\alpha_s) \quad (50)$$

$$X_{sha_rel} = R_{sha} * \sin(\gamma_{sha}) \quad (51)$$

$$y_{sha_rel} = R_{sha} * \cos(\gamma_{sha}) \quad (52)$$

$$X_{sha_abs} = Field_{centrox} - X_{sha_rel} - C_x \quad (53)$$

$$Y_{sha_abs} = Field_{centroy} - y_{sha_rel} - C_y \quad (54)$$

Siendo C_x y C_y las coordenadas del módulo en x, y, respectivamente. Después se acumula la irradiancia en una matriz que representa el campo a lo largo del tiempo.

$$M_{field} = M_{field} + M_{field_inst} * (100 * 100) \quad (55)$$

Las fracciones de área con irradiancia directa (A_d) y difusa (A_g) se calculan como:

$$A_g = \frac{A_{cell} - A_{dif_cont}}{A_{cell}} \quad (56)$$

$$A_d = \frac{A_{dif_cont}}{A_{cell}} \quad (57)$$

Donde A_{cell} es el área total del campo y A_{dif_cont} es el conteo de celdas con irradiancia difusa.

3.4.3 Sistema de bombeo.

Para la simulación del sistema de bombeo se utilizó la ficha técnica de datos de la bomba PSk2-70 C-SJ150-1 de la marca Lorentz (véase Figura 26 para la curva de eficiencia (en negro) y caudal correspondiente a la bomba del sitio de estudio (en azul) y el **Anexo A** para la ficha técnica), la cual es la que se encuentra instalada en los Huertos Familiares del ejido Laguna Salada. Haciendo uso de esta, se determinó por interpolación el flujo y la eficiencia de la bomba según la potencia que se suministrara. El tanque de riego para el riego y para consumo humano en el ejido fue determinado como una sumatoria del caudal de la bomba multiplicada por el incremento del tiempo de simulación.

$$Tanque = \sum_{n=1}^N Q_{bomba}(n)\Delta t \quad (58)$$

Donde $Q_{bomba}(n)$ es el caudal de la bomba en el paso n en L/h, Δt es el incremento de tiempo de la simulación en fracción de hora y N es el número total de pasos.

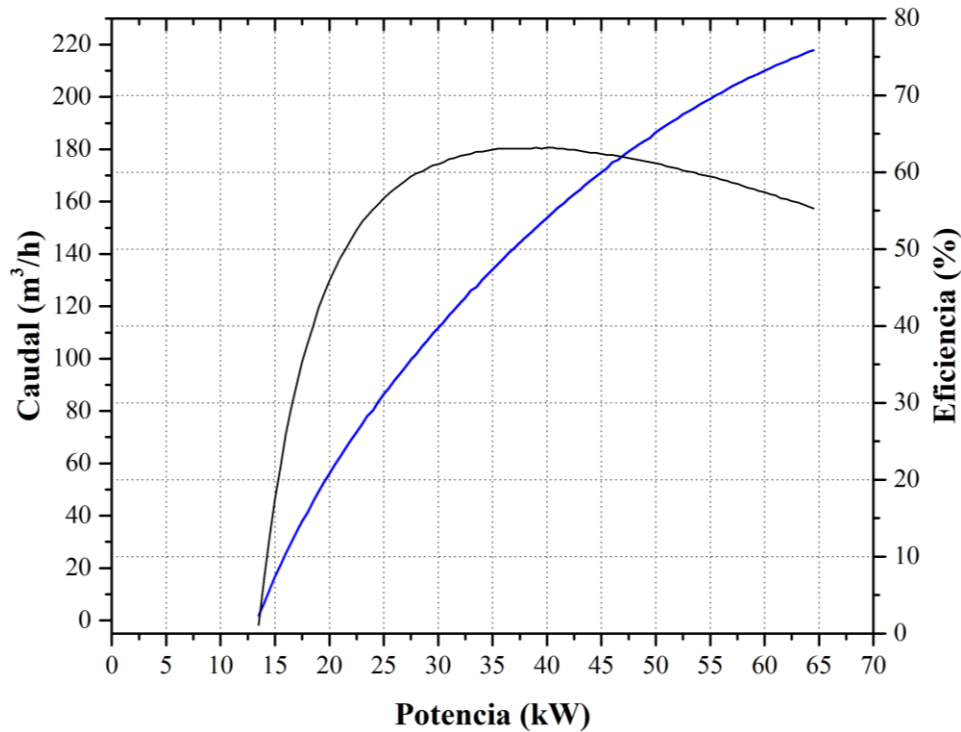


Figura 26. Curva de eficiencia (negro) y caudal de la bomba (azul) del caso de estudio.

3.4.4 Sistema de riego.

A partir de la evapotranspiración del cultivo, Et_c (FAO Penman-Monteith, sección 2.4.3 Evapotranspiración.), se calcula el tiempo de riego requerido bajo un sistema de emisores. El número de emisores por planta se define como:

$$NEP = \frac{DSH * NoLat}{DEE} \quad (59)$$

Donde DSH es la distancia entre emisores en la hilera, $NoLat$ el número de laterales y DEE la distancia entre emisores. La intensidad de precipitación del sistema de riego, definida como el caudal aplicado por unidad de área ($L/h/m^2$), se calcula mediante:

$$Ipp = \frac{Qe * NEP}{DEH * DSH} \quad (60)$$

En donde DEH corresponde a la distancia entre hileras y DSH a la distancia sobre la hilera.

La lámina bruta requerida se determina considerando la eficiencia de riego por goteo (Eff_{goteo}).

$$Lb = \frac{Et_c}{Eff_{goteo}} \quad (61)$$

Y el tiempo de riego sugerido es:

$$TR = \frac{Lb}{Ipp} \quad (62)$$

Para implementar el riego en tiempo discreto con paso Δt (h), se define la tasa de aplicación requerida sobre el área de riego $A_{cultivo}$ como:

$$\dot{V}_{req}(n) = Ipp(n) * A_{cultivo} \quad (63)$$

Y el volumen requerido en el intervalo n es:

$$V_{req}(n) = \dot{V}_{req}(n) * \Delta t \quad (64)$$

El sistema puede satisfacer $V_{req}(n)$ mediante dos fuentes: sistema de riego o tanque. El volumen efectivamente aplicado en cada intervalo se modela como:

$$V_{aplicado}(n) = \begin{cases} Q_{riego}(n)\Delta t, & \text{si } P_{bomba}(n) \geq P_{min} \\ V_{req}(n), & \text{si } P_{bomba}(n) < P_{min}, Nub(n) = 1, Tanque(n) \geq V_{req}(n) \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (65)$$

Donde P_{min} es la potencia mínima de activación de la bomba, $Nub(n)$ es un indicador de condición de nubosidad y $Tanque(n)$ es el volumen disponible en el tanque.

3.4.5 Distribución y almacenamiento de energía.

La distribución de energía se modela a través del gestor (controlador de cargas) que opera sobre el bus de corriente directa, asignando la potencia disponible del sistema fotovoltaico entre el suministro a cargas (vía inversor), la carga/descarga del banco de baterías. El despacho se formula por escenarios: en condición de déficit, la energía almacenada en baterías se utiliza para cubrir la demanda hasta el límite permitido por su estado energético y el faltante remanente se asigna al auxiliar; en condición de excedente, la potencia restante se almacena en el banco de baterías, respetando el límite de transferencia de energía y su capacidad máxima de almacenamiento. Para realizarlo, se dispone de un perfil horario de

demanda eléctrica en corriente alterna $Demanda_{AC}(n)$. La demanda equivalente en CD se define como:

$$Demanda_{DC} = \frac{Demanda_{AC}}{Eff_{Inversor}} \quad (66)$$

Donde $Eff_{Inversor}$ es la eficiencia del inversor, que en este caso se considera del 90%.

Sea $Gestor(n)$ la potencia disponible en el bus CD (kW) y $Sist_{Bat}(n)$ la energía almacenada en baterías (kWh). Para un paso de simulación de duración Δt (h), la potencia promedio disponible desde baterías se expresa como:

$$P_{Bat}(n) = \frac{Sist_{Bat}(n)}{\Delta t} \quad (67)$$

La energía transferida del gestor hacia baterías está limitada por $TransfMax_{sistBat}$ y por la capacidad máxima de almacenamiento $Cap_{sistBat}$.

Caso 1: Déficit de potencia en CD ($Gestor(n) < Demanda_{DC}(n)$)

Primero se define la potencia faltante:

$$P_{falt}(n) = Demanda_{DC}(n) - Gestor(n) \quad (68)$$

La potencia que se entrega desde baterías al bus CD se define por casos:

$$P_{BatGesor}(n) \begin{cases} P_{falt}(n), & si P_{Bat}(n) \geq P_{falt}(n) \\ P_{Bat}(n), & si P_{Bat}(n) < P_{falt}(n) \end{cases} \quad (69)$$

Se actualiza el estado energético de las baterías:

$$Sist_{Bat}(n+1) = Sist_{Bat}(n) - P_{BatGesor}(n)\Delta t \quad (70)$$

Finalmente, si después de baterías aún existe déficit, el generador auxiliar cubre lo restante.

Caso 2: Excedente de potencia en DC ($Gestor(n) > Demanda_{DC}(n)$)

La potencia excedente se define como:

$$P_{exc}(n) = Gestor(n) - Demanda_{DC}(n) \quad (71)$$

La potencia transferida del gestor hacia baterías se define por casos, incorporando el límite de transferencia:

$$P_{GestorBat} = \begin{cases} P_{exc}(n), & \text{si } P_{exc}(n) \leq TransfMax_{sistBat} \\ TransfMax_{sistBat}, & \text{si } P_{exc}(n) > TransfMax_{sistBat} \end{cases} \quad (72)$$

La energía almacenada se actualiza (y se satura por capacidad):

$$Sist_{Bat}(n+1) = \begin{cases} Sist_{Bat}(n) + P_{GestorBat}(n)\Delta t, & \text{si } Sist_{Bat}(n+1) \leq Cap_{sistBat} \\ Cap_{sistBat}, & \text{si } Sist_{Bat}(n) + P_{GestorBat}(n)\Delta t > Cap_{sistBat} \end{cases} \quad (73)$$

En este caso, el auxiliar no opera.

Caso 3: Balance exacto ($Gestor(n) = Demanda_{DC}(n)$)

$$P_{GestorBat}(n) = 0, \quad P_{BatGestor}(n) = 0, \quad Auxiliar(n) = 0 \quad (74)$$

Por último, la potencia entregada por el inversor a las cargas (en CA) se expresa como:

$$Suministro_{AC}(n) = Demanda_{DC}(n) * Eff_{Inversor} \quad (75)$$

3.5 Configuración y ejecución de la simulación.

Esta simulación tiene como objetivo evaluar el desempeño operativo anual de la propuesta de sistema agrovoltaico para el Ejido Laguna Salada, considerando de manera integrada la generación fotovoltaica, la extracción y distribución de agua para riego y abastecimiento humano, y la gestión energética mediante almacenamiento y respaldo diésel. El propósito es cuantificar la capacidad del sistema para cubrir las necesidades hídricas y eléctricas del sitio bajo condiciones meteorológicas variables, y comparar configuraciones del arreglo agrovoltaico (por ejemplo, densidad agrovoltaica, estrategia de operación y capacidades de almacenamiento) con base en indicadores técnicos y energéticos.

El proceso de simulación se ejecuta en pasos discretos de duración Δt (fracción de hora) a lo largo del horizonte de análisis. Como entradas principales se consideran: la ubicación del

sitio, la fecha y hora de simulación, parámetros geométricos del sistema, un archivo climatológico (irradiancia y temperatura ambiente), un perfil horario de demanda eléctrica en corriente alterna, las características de la bomba (caudal y eficiencia en función de la potencia disponible), y una base de datos de riego por cultivo (calendario y etapas de desarrollo). Con esta información, en cada paso temporal se calcula la geometría solar, la irradiancia incidente sobre el arreglo y la potencia fotovoltaica disponible. Adicionalmente, se estima la distribución espacial de radiación bajo los módulos fotovoltaicos (modelo de sombras), lo cual alimenta el cálculo de evapotranspiración del cultivo y, en consecuencia, el requerimiento de riego y el tiempo de riego sugerido.

En paralelo, la operación eléctrica se formula en el bus de corriente directa mediante el Gestor (controlador de cargas), que asigna la potencia disponible del sistema FV entre: el suministro a cargas vía inversor, la carga/descarga del banco de baterías, y el respaldo mediante generador diésel cuando la generación fotovoltaica y el almacenamiento no son suficientes para cubrir la demanda. El despacho se evalúa por escenarios de déficit, excedente y balance, respetando los límites de capacidad del banco y la energía máxima de transferencia hacia baterías. Finalmente, el inversor entrega la potencia a las cargas comunitarias en corriente alterna con la eficiencia considerada.

Esta simulación tiene como objetivo modelar el comportamiento de la propuesta de sistema agrovoltaico diseñado para satisfacer tanto la demanda eléctrica como las necesidades de riego para el sitio de estudio. El sistema busca optimizar el uso de la energía solar disponible, irrigar los cultivos sembrados en los huertos familiares del ejido, gestionando la carga del sistema de baterías y activando fuentes auxiliares cuando sea necesario, garantizando un suministro eléctrico continuo y eficiente. Para así poder seleccionar la configuración de sistema agrovoltaico más conveniente para el ejido Laguna Salada.

El resultado de la simulación consiste en series temporales y métricas de desempeño (energía fotovoltaica utilizada, energía almacenada, energía suministrada por el auxiliar, volúmenes bombeados, volumen en tanque, agua aplicada al cultivo, horas de riego efectivo y fracciones de tiempo con operación en contingencia), las cuales permiten comparar configuraciones del sistema y seleccionar la alternativa más conveniente para el

Ejido Laguna Salada. La Figura 27 presenta el diagrama de flujo general de la simulación, y la Figura 28 resume la interacción energética entre subsistemas. Por claridad, el diagrama se presenta a nivel de módulos; las decisiones de operación (irradiancia disponible, umbrales de bombeo, nivel de tanque y modo contingencia) se ejecutan dentro del módulo de bombeo–irrigación–tanque y se describen en la sección “3.4.4 Sistema de riego.” y la sección “3.4.3 Sistema de bombeo.”

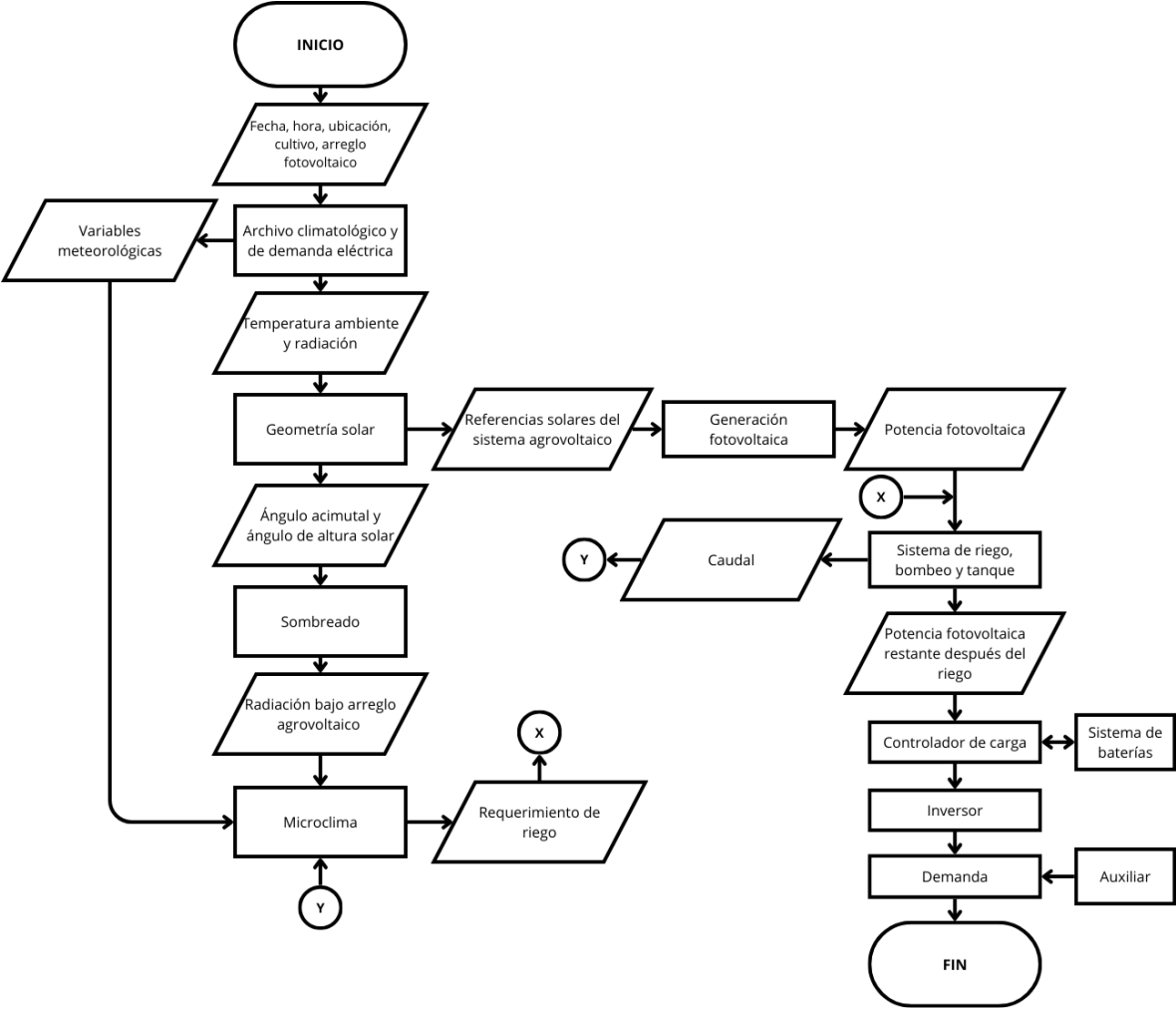


Figura 27. Diagrama de flujo general de la simulación.

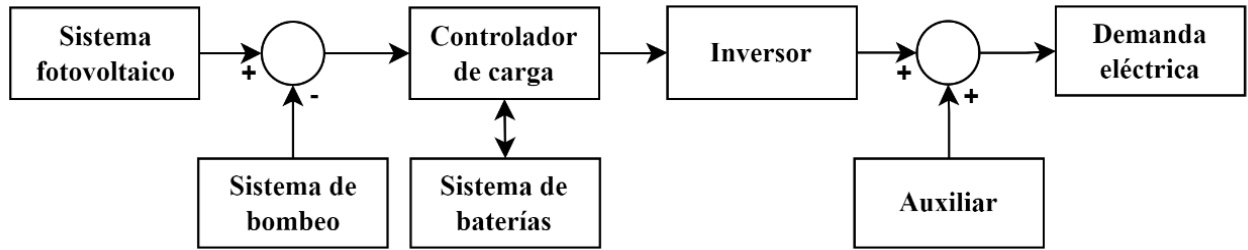


Figura 28. Diagrama de la interacción energética entre los subsistemas de la simulación.

3.6 Diseño experimental del pilotaje para la validación del modelo matemático.

Con el objetivo de validar el modelo matemático desarrollado del sistema agrovoltaico para predecir la generación fotovoltaica y la distribución espacial de irradiancia en sistemas agrovoltaicos, se construyó un pilotaje ubicado en la azotea del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, en la ciudad de Mexicali, Baja California. Las coordenadas geográficas del sitio son aproximadamente 32.6°N de latitud y 115.5°O de longitud, a una altitud de 10 metros sobre el nivel del mar.

El pilotaje está conformado por un sistema fotovoltaico de pequeña escala con monitoreo de temperatura de celda y monitoreo de producción energética por el inversor, así como una zona de monitoreo de la irradiancia debajo del sistema fotovoltaico. La Figura 29 presenta un diagrama general del sistema, donde se ilustran los componentes principales y su disposición espacial dentro del área de prueba.

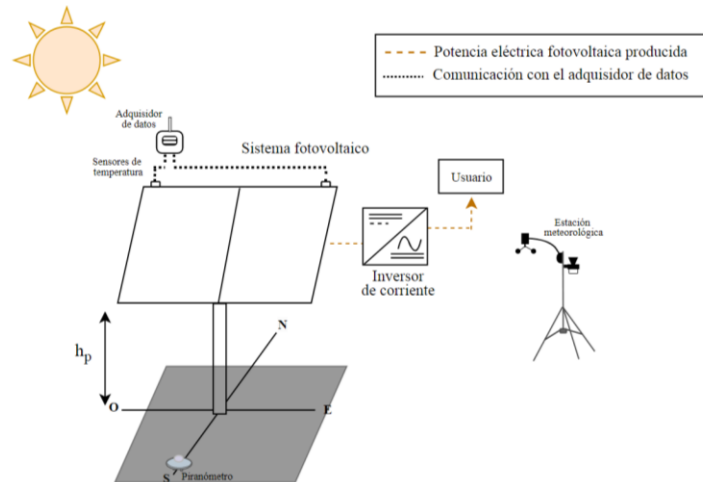


Figura 29. Diagrama del pilotaje experimental.

El pilotaje está conformado por un sistema fotovoltaico de dos módulos solares de 300 W cada uno, marca SunPower, instalados con una inclinación de 32° sobre un monoposte metálico a una altura de 1.63 metros respecto al suelo. La orientación de los módulos es hacia el sur geográfico, lo cual permite maximizar la captación solar durante todo el año. El sistema se encuentra conectado a un inversor modelo YC600B de la marca APSsystems (Figura 30). Adicionalmente, se instrumentó el sistema con sensores de temperatura instalados en los módulos fotovoltaicos (Figura 31), con el propósito de realizar la corrección de la eficiencia del sistema por temperatura de los módulos y así validar la eficiencia y el desempeño del bloque de simulación encargado de modelar la generación eléctrica (véase Anexo B para las especificaciones técnicas).



Figura 30. Instalación del inversor de corriente en el pilotaje experimental.



Figura 31. Instalación de los sensores de temperatura en el pilotaje experimental.

Para validar el modelo de sombras (encargado de estimar la distribución espacial y el nivel de irradiancia incidente bajo el sistema fotovoltaico), se utilizaron los siguientes instrumentos de medición:

- Un piranómetro ubicado bajo los módulos, en una zona representativa de sombra parcial, para registrar los niveles de irradiancia efectiva sobre el plano agrícola (Figura 32).
- Una estación meteorológica Davis Vantage Pro2, instalada a campo abierto y en una posición libre de obstrucciones, para registrar la irradiancia global fuera del área sombreada, así como otras variables meteorológicas necesarias para el análisis energético y climático del sitio (véase Anexo C).



Figura 32. Instalación del piranómetro debajo del pilotaje experimental.

3.7 Método integral de dimensionamiento agrovoltaico para zonas aisladas.

El proceso de dimensionamiento propuesto se estructura en una secuencia lógica y cronológica que permite garantizar la coherencia entre los recursos disponibles, las metas productivas y las demandas energéticas a satisfacer. Este enfoque metodológico contempla los siguientes pasos:

1. Identificación de los recursos disponibles: que incluyen la disponibilidad de agua subterránea o superficial, la radiación solar, la superficie agrícola y la temporalidad de producción.
2. Determinación de los productos obtenidos: a partir de dichos recursos, es decir, la producción agrícola esperada, la cantidad de agua extraída, y la generación de energía eléctrica.
3. Jerarquización del cálculo de las demandas a satisfacer: priorizando en primer lugar la producción agrícola y su requerimiento hídrico, luego la demanda de agua para

consumo residencial, y finalmente, el suministro energético para bombeo y otras cargas.

El proceso de dimensionamiento inicia con la determinación de los cultivos y su producción estimada, lo que permite calcular la cantidad de agua requerida en función de la lámina bruta de riego. A partir de esta necesidad hídrica, se dimensiona el sistema de bombeo considerando la altura manométrica y la eficiencia del equipo, con la demanda total de agua establecida, se evalúa el consumo de agua residencial y comercial. Posteriormente, se calcula la cantidad de energía eléctrica para atender la demanda de acometidas residenciales y si es posible otras cargas. Finalmente, se determina la capacidad del sistema agrovoltaico necesario para satisfacer en su totalidad la demanda eléctrica del poblado y se evalúa si es posible llevarla a cabo en función de los recursos que se tienen disponibles. Esta estrategia de dimensionamiento puede verse representada gráficamente en la Figura 33.

3.7.1 Identificación de recursos.

Para determinar la factibilidad del sistema, primero se identifican y cuantifican los recursos naturales disponibles en la comunidad.

3.7.1.1 Acuífero (Disponibilidad de agua subterránea y superficial).

- Nivel freático: Profundidad a la que se encuentra el agua subterránea.
- Concesión del acuífero: Permiso otorgado por CONAGUA para determinar la cantidad de agua que puede ser aprovechada por el usuario sin dañar el nivel freático de este.
- Volumen disponible del acuífero o fuente de agua superficial (ríos, presas, pozos): Volumen de agua extraíble sin afectar la recarga natural.

3.7.1.2 Radiación solar.

- Irradiancia solar media en la zona (W/m^2 o $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$): Se obtiene de bases de datos meteorológicas como NASA POWER o PVGIS.
- Horas de sol pico (HSP): Indica cuántas horas al día se tiene una irradiancia equivalente a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

3.7.1.3 Tierras agrícolas.

- Superficie cultivable disponible (ha o m²).

3.7.1.4 Tiempo.

- Épocas de siembra y cosecha: Determinan la demanda de agua en distintos periodos del año.
- Duración de la temporada de riego.

3.7.2 Productos esperados a partir de los recursos.

Con los recursos identificados, se determina lo que se puede producir y en qué cantidad:

- 1. Producción agrícola:** Depende de la tierra disponible, la temporalidad y la demanda de agua de los cultivos.
- 2. Producción de agua:** Se calcula en función de la demanda agrícola residencial y comercial.
- 3. Producción de energía eléctrica:** Se obtiene a partir del volumen de producción de agua para el bombeo y las cargas a las que se necesiten suministrar.

3.7.3 Cálculo de demandas y dimensionamiento.

Se dimensionan las necesidades en el siguiente orden lógico:

1. Demanda agrícola (para consumo comercial y residencial).
2. Demanda de agua (para consumo comercial y residencial).
3. Demanda energética (para bombeo y suministro eléctrico comunitario).

3.7.3.1. Demanda agrícola.

Definición de la producción agrícola.

La selección de cultivos debe basarse en factores como la demanda del mercado, la adaptación a las condiciones locales, y la disponibilidad de recursos. En esta etapa, se define cuánto se desea producir para consumo comercial y residencial.

Selección de cultivos y producción esperada anualmente.

Para determinar el área requerida para el cultivo (A_{req}), es necesario tener presente la producción esperada del cultivo (P_{obj}). Esto implica tomar en cuenta el rendimiento

promedio del cultivo en toneladas por hectárea (R_c), y el número de cosechas que se pueden realizar por año (N_c), ya que algunos cultivos permiten múltiples ciclos productivos anuales. Esto influye directamente en el rendimiento total anual por hectárea, el cual se calcula como:

$$R_{c\text{total}} = R_c N_c \quad (76)$$

A partir de ello, se determina el área requerida para cumplir con la producción objetivo:

$$A_{req} = \frac{P_{obj}}{R_{c\text{total}}} \quad (77)$$

Si $A_{req} \leq A_{disp}$, la producción es viable.

En caso de contar con un área predeterminada para el sistema agrovoltaico (A_{disp}), es posible estimar la producción agrícola potencial (P_{pos}) tomando en cuenta el rendimiento promedio del cultivo por hectárea (R_c) y el número de cosechas que pueden realizarse por año (N_c).

$$P_{pos} = A_{disp} * R_c * N_c \quad (78)$$

Este valor representa la cantidad máxima de producto que puede cosecharse anualmente bajo las condiciones actuales de rendimiento y frecuencia de cosecha. A partir de este resultado, se puede definir la fracción destinada al consumo comercial (P_c) y al residencial (P_{res}) según los objetivos del sistema.

$$P_{res} = P_{obj} * f_r ; P_c = P_{obj} * f_c \quad (79)$$

Esto nos permite tener una visión clara de las necesidades agrícolas, tanto para el mercado como para el consumo local. Además, a partir de estos cálculos es posible obtener indicadores clave de producción agrícola que resultan útiles para el dimensionamiento y evaluación del sistema agrovoltaico:

- La producción total anual esperada (P_{obj} , en ton/año), cuando se parte de una meta de producción y se desea calcular el área requerida;
- la producción agrícola potencial máxima (P_{pos} , en ton/año), cuando se parte de un área disponible y se desea estimar cuánto se puede producir;
- y el rendimiento agrícola anual por hectárea ($R_{c\ total}$, en ton/ha). Estos indicadores permiten evaluar tanto la viabilidad del sistema como su eficiencia productiva bajo distintas configuraciones, de acuerdo con los objetivos definidos.

3.7.3.2. Demanda hídrica.

Una vez determinada la producción agrícola, se debe calcular el volumen de agua necesario para regar los cultivos, así como el agua necesaria para el consumo humano.

Agua para riego.

Cada cultivo tiene una demanda de agua específica, que depende de la lámina bruta, que es la cantidad de agua necesaria para mantener el cultivo en condiciones óptimas.

La demanda hídrica de cada cultivo puede calcularse usando la siguiente fórmula:

$$W_c = A_{req} * L_b * t_c \quad (80)$$

Donde:

- W_c = Demanda hídrica del cultivo [L/año o m³/año].
- L_b = Lámina bruta de agua necesaria por el cultivo [L/m² o m³/ha] (calculada según la evapotranspiración ajustada a las condiciones locales).
- A_{req} = Superficie cultivada [m² o ha].
- t_c = Duración de la temporada del cultivo (días).

El volumen total de agua para riego (W_{Riego} , en L/año o m³/año) se obtiene sumando la demanda de todos los cultivos (en caso de que se desee implementar más de un tipo):

$$W_{riego} = \sum W_c \quad (81)$$

Este valor nos proporciona la cantidad total de agua anual necesaria para mantener la producción agrícola.

Agua para consumo humano.

Además de la demanda agrícola, también se debe calcular el consumo de agua para las viviendas del poblado.

El consumo de agua residencial depende del número de habitantes y su consumo promedio.

La fórmula es:

$$W_{res} = P_h * C_h \quad (82)$$

Dónde:

- W_{res} = Agua requerida para uso humano [m³/año].
- P_h = Población del ejido.
- C_h = Consumo de agua por habitante [m³/día].

El volumen total de agua necesario anual (W_{anual}) y el caudal constante necesario para satisfacer la demanda hídrica según las horas de operación de la bomba (Q_{anual}), en m³/s será:

$$W_{anual} = W_{riego} + W_{res} \quad (83)$$

$$Q_{anual} = \frac{W_{anual}}{5.5 * 365 * 3600} \quad (84)$$

Si $Q_{total} \leq Q_{limite}$, la cantidad de agua que se pretende utilizar es viable para satisfacer las necesidades hídricas agrícolas, residenciales y comerciales.

Además de los indicadores agrícolas, es posible calcular el volumen de agua requerido para producir cada tonelada de cultivo (W_{ton}). Este indicador se expresa en metros cúbicos por

tonelada (m^3/ton) y se obtiene al relacionar la lámina bruta anual de riego (L_b , en m^3/ha) con el rendimiento agrícola total anual ($R_{c\,total}$).

$$W_{ton} = \frac{L_b}{R_{c\,total}} \quad (85)$$

Este valor proporciona una medida del recurso hídrico necesario por unidad de producto obtenido, útil para evaluar la sostenibilidad del sistema agrovoltaico en función del consumo de agua. Dando como total dos indicadores hídricos:

- el requerimiento hídrico por hectárea (L_b , en m^3/ha);
- y el requerimiento hídrico por tonelada de cultivo producido (W_{ton} , en m^3/ton), cuando se parte de un área disponible y se desea estimar cuánto se puede producir.

3.7.3.3. Demanda de energía eléctrica.

El siguiente paso consiste en determinar cuánta energía eléctrica se necesitará para cubrir las necesidades de bombeo, las acometidas residenciales y el cuarto frío.

Energía requerida para el bombeo solar.

El sistema de bombeo solar se dimensiona en función de la potencia hidráulica requerida para bombear el volumen de agua necesario. Para calcular la potencia hidráulica se usa la siguiente fórmula:

$$P_{bombeo} = \frac{\rho g Q_{anual} H}{\eta_{bomba}} \quad (86)$$

Para calcular la energía que se utilizaría anualmente para el bombeo de agua se requiere conocer el tiempo de operación de la bomba. Para fines de este análisis, el tiempo de operación se estima con base en las horas pico solares promedio del sitio (HSP), ya que estas representan las horas equivalentes al día durante las cuales la irradiancia solar es suficiente para operar el sistema a su máxima capacidad. Al considerar este parámetro, se logra una estimación representativa de la energía anual que puede ser suministrada por el sistema fotovoltaico.

$$E_{bombeo} = P_{bombeo} * t_{operacion} * 365 \quad (87)$$

Donde:

- P_{bombeo} = Potencia requerida por el sistema de bombeo [W].
- E_{bombeo} = Energía requerida por el sistema de bombeo [kWh].
- ρ = Densidad del agua [1000 kg/m³].
- g = Gravedad [9.81 m/s²].
- Q_{anual} = Caudal requerido [m³/s].
- H = Altura manométrica total [m].
- η_{bomba} = Eficiencia del sistema de bombeo.
- $t_{operacion}$ = Horas solares pico del sitio (h).

Además de los indicadores agrícolas e hídricos, es posible obtener indicadores energéticos que permiten evaluar la eficiencia del sistema agrovoltaico en términos del consumo de energía eléctrica, particularmente en el proceso de riego mediante bombeo solar.

- Energía eléctrica utilizada por metro cubico de agua bombeada (kWh/m³):

A partir de la energía necesaria anual para el bombeo (kWh) y el requerimiento hídrico anual del ejido (m³) podemos obtener la energía eléctrica anual necesaria por cada metro cubico de agua que se necesite.

$$CE_{agua} = \frac{E_{bombeo}}{W_{anual}} \quad (88)$$

- Energía eléctrica anual por hectárea cultivada (kWh/ha):

Relaciona el consumo de energía con la superficie agrícola irrigada, en función de la lámina bruta anual de riego (L_b , en m³/ha):

$$E_{ha} = L_b * CE_{agua} \quad (89)$$

- Energía eléctrica por tonelada de producto cosechado (kWh/ton):

Relaciona el consumo energético para regar cada m³ de sembradío con el requerimiento hídrico por tonelada de cultivo producido (m³/ton):

$$E_{ton} = W_{ton} * CE_{agua} \quad (90)$$

Estos indicadores permiten evaluar la eficiencia energética del sistema de bombeo en función de la productividad agrícola, facilitando decisiones para mejorar el diseño del sistema y su viabilidad técnica y económica.

Demanda energética para las acometidas residenciales.

Para las acometidas eléctricas, es necesario conocer la demanda energética total de las viviendas del ejido. Esta se puede calcular con la fórmula:

$$E_r = N_h * C_h \quad (91)$$

Donde:

- E_r = Energía eléctrica para viviendas [kWh].
- N_h = Número de hogares.
- C_h = Consumo promedio de cada hogar anualmente [kWh].

Suma total de la energía requerida.

$$E_{total} = E_{bombeo} + E_{residencial} \quad (92)$$

Y si la energía disponible lo permite, pueden ser consideradas otras cargas.

3.7.4 Dimensionamiento del sistema agrovoltaico.

Se calcula la potencia pico del sistema fotovoltaico necesaria para satisfacer la demanda total considerando la producción solar disponible:

$$P_{FV} = \frac{E_{total}}{HSP * PR} \quad (93)$$

Donde:

- HSP = Horas solares pico del sitio.
- PR = Coeficiente de rendimiento del sistema fotovoltaico (0.75–0.85).

3.7.5 Verificación de viabilidad agrovoltaica: compatibilidad entre área, energía y agricultura.

Cuando se pretende implementar un sistema fotovoltaico sobre tierras agrícolas mediante agrovoltaica, es fundamental verificar si la potencia calculada en el punto 4 puede realmente instalarse dentro del área cultivable, sin comprometer la producción agrícola. Esta verificación considera la densidad agrovoltaica máxima permitida para el cultivo, el área de terreno disponible y la potencia instalada por metro cuadrado.

3.7.5.1. Cálculo del área máxima disponible para el sistema agrovoltaico.

A partir del área cultivable A_{disp} (en m² o hectáreas) y la densidad agrovoltaica recomendada para el cultivo D_{apv} (como fracción), se determina el área máxima sobre la cual se pueden instalar módulos:

$$A_{FVreal} = A_{disp} * D_{apv} \quad (94)$$

3.7.5.2. Potencia máxima instalable.

Si se conoce el área de cada módulo fotovoltaico A_{mod} (en m²) y su potencia nominal P_{mod} (en W), la potencia fotovoltaica máxima instalable es:

$$N_{mod,max} = \frac{A_{FVreal}}{A_{mod}} \quad (95)$$

$$P_{FV,max} = N_{mod,max} * P_{mod} \quad (96)$$

3.7.5.3. Análisis de cumplimiento de cargas.

Con la potencia realmente disponible para instalar, se realiza una verificación por prioridades:

1. Bombeo solar (riego y consumo humano)
2. Acometidas eléctricas de viviendas.

Se comparan las cargas totales requeridas con la finalidad de que se cumpla la siguiente expresión:

$$E_{FV,max} - E_{total} = 0 \quad (97)$$

Existen dos posibles escenarios:

1. El resultado es positivo o igual a cero: se cumple con la energía. El área disponible permite instalar toda la potencia necesaria sin comprometer el cumplimiento del suministro a las demandas energéticas.
2. El resultado es negativo: no se cumple con la energía. La densidad agrovoltaica limita la instalación fotovoltaica, y no se logra cubrir todas las demandas energéticas. Por lo que se sugiere:
 - Reducir cargas no prioritarias.
 - Complementar con otra fuente.
 - Cambiar el cultivo (uno con mayor densidad agrovoltaica).
 - Buscar terreno adicional.

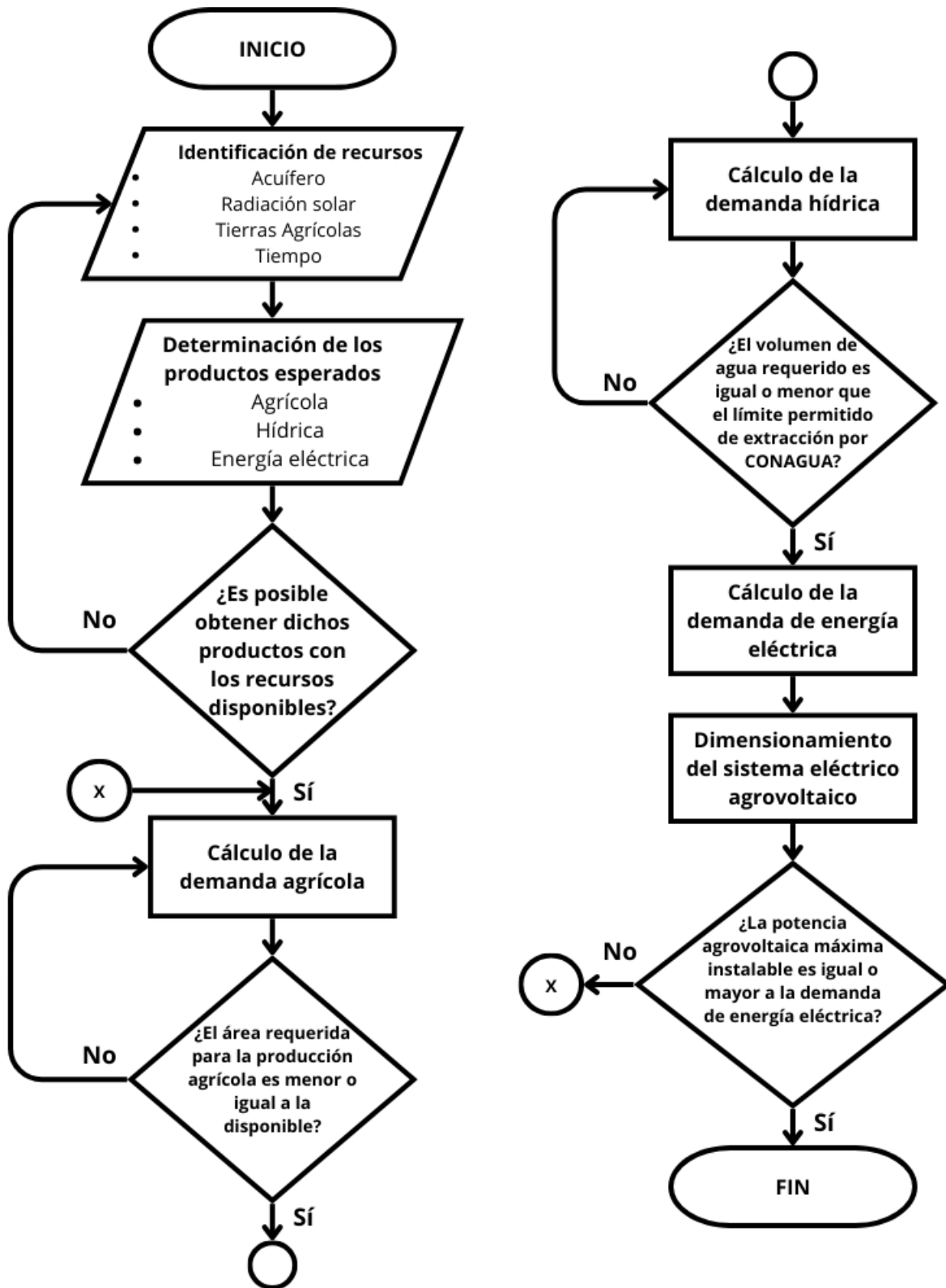


Figura 33. Metodología para el dimensionamiento de un sistema agrovoltaico para una comunidad aislada.

Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



“A menudo son los pequeños pasos, no los grandes saltos, los que generan el cambio más duradero”.

- Isabel II del Reino Unido.

4.1 Validación experimental del modelo matemático.

4.1.1 Producción eléctrica fotovoltaica.

La Figura 34 muestra la comparación entre la potencia fotovoltaica medida experimentalmente y la simulada mediante el modelo desarrollado, para el día 138 del año (17 de mayo), en el intervalo de 07:00 a 19:00 horas. Se consideran varios escenarios en la simulación: uno que incluye la temperatura de celda medida, y otro que la omite, considerando únicamente la temperatura de celda calculada dentro del modelo.

Como se puede observar, la inclusión de la temperatura de celda en el modelo permite una estimación mucho más precisa de la generación eléctrica, con una alta concordancia respecto a los datos experimentales. Esto pone en evidencia la influencia térmica sobre el rendimiento de los módulos fotovoltaicos, ya que, a mayores temperaturas de operación, la eficiencia del módulo disminuye. Por otro lado, la curva de irradiancia muestra el perfil típico de un día despejado, alcanzando valores máximos alrededor del mediodía ($\sim 950 \text{ W/m}^2$). Las curvas de temperatura ambiental y de celda siguen un patrón similar, aunque la temperatura de la celda se mantiene significativamente más alta que la del ambiente, con un diferencial que supera los $15 \text{ }^\circ\text{C}$ en las horas pico. La temperatura calculada mediante el modelo se ve fuertemente influenciada por la irradiancia.

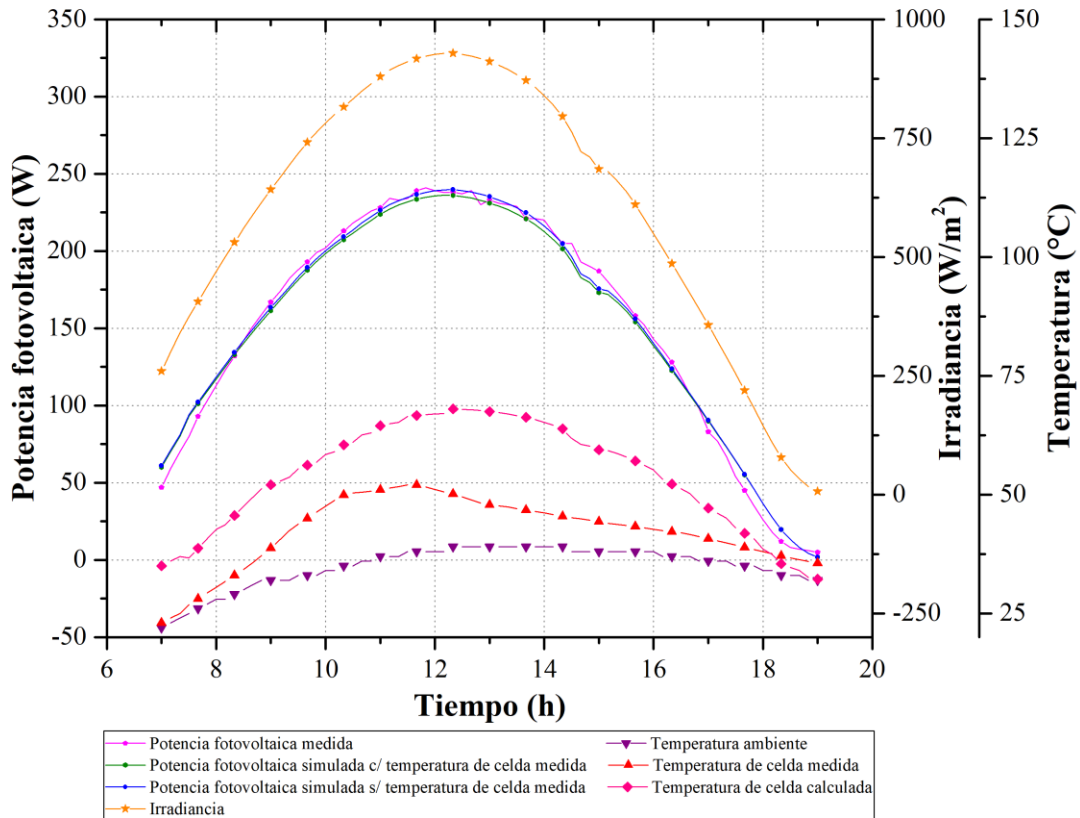


Figura 34. Validación de la programación del modelo de generación fotovoltaica del sistema experimental.

4.1.2 Modelo de sombras.

La Figura 35 presenta los resultados de la validación del modelo de distribución de irradiancia en el plano del sistema agrovoltaico, correspondientes al día 138 del año, en un intervalo horario de 07:00 a 19:00 horas. Se comparan tres series: la irradiancia medida fuera del sistema (mediante estación meteorológica), la irradiancia bajo los módulos (obtenida con piranómetro), y la irradiancia simulada por el modelo desarrollado.

Se observa que el modelo reproduce con buena precisión las condiciones experimentales. Durante las horas centrales del día, la diferencia entre la irradiancia fuera del sistema y la irradiancia bajo los módulos es clara, destacando el efecto de sombreado generado por la instalación fotovoltaica. La irradiancia máxima registrada fuera del sistema alcanzó valores cercanos a los $900 W/m^2$, mientras que en la zona sombreada se observaron valores

cercanos a los 100 W/m^2 , confirmando la efectividad del sistema en la modulación de la radiación solar incidente.

Además, se aprecia un pico de irradiancia registrado bajo los módulos alrededor de las 12:00 horas. Este comportamiento se atribuye a un detalle constructivo de la instalación: los módulos fotovoltaicos no están completamente unidos entre sí, ya que existe una separación entre ellos provocada por las abrazaderas del sistema de montaje. Estos separadores permiten la expansión térmica de los módulos sin que se dañen, pero también permiten el paso puntual de radiación solar directa hacia el área sombreada durante el mediodía. Este fenómeno, aunque localizado, es capturado de manera adecuada por el modelo, lo cual respalda su capacidad para representar no solo el sombreado general, sino también las particularidades derivadas del diseño físico del sistema.

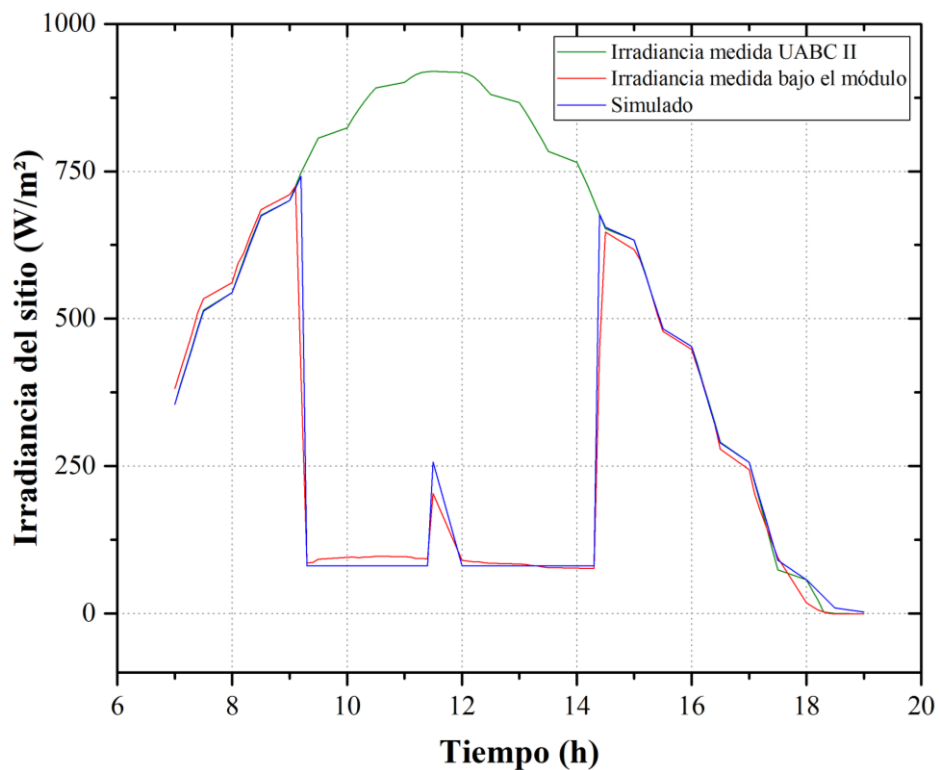


Figura 35. Validación de la programación del modelo de sombras del sistema experimental.

4.2 Aplicación del simulador al sitio de estudio.

Para observar las dinámicas del sistema actual, se valida el modelo matemático previamente formulado mediante simulaciones del comportamiento energético e hídrico de la instalación existente. Este enfoque facilita la identificación de cuellos de botella y la evaluación integral de su desempeño, estableciendo un punto de partida sólido para un rediseño basado en criterios agrovoltaicos. Lejos de una extrapolación genérica, la propuesta se configura como una adaptación contextualizada, arraigada en las condiciones agrícolas, sociales y climáticas específicas del ejido.

4.2.1 Sistema de bombeo.

Se realizaron simulaciones representativas para tres días clave del año: solsticio de verano (día juliano 172), equinoccio de otoño (día 263) y solsticio de invierno (día 355). Estas simulaciones consideran variables ambientales y técnicas relevantes, como la temperatura ambiente, la irradiancia solar incidente en el sitio, la potencia neta generada por el sistema fotovoltaico y el flujo de agua bombeada resultante de dicha generación energética.

Durante el solsticio de verano (día 172, Figura 36), la temperatura ambiente presentó un incremento progresivo a lo largo del día, alcanzando un valor máximo cercano a los 40 °C alrededor de las 17:00 horas. En paralelo, la producción eléctrica del sistema fotovoltaico mostró un comportamiento directamente proporcional a la irradiancia solar, alcanzando su valor máximo en torno al mediodía solar con una irradiancia de 895 W/m² y una potencia neta de generación de 60 kW. Este pico de generación permitió alcanzar un flujo de bombeo máximo de aproximadamente 225,000 L/h. La cantidad total de agua bombeada durante el día fue de 1,342 m³.

En cuanto a la demanda hídrica del cultivo establecido en el ejido, actualmente 15,800 m² sembrados con palma datilera, para esta fecha del año se estima una necesidad de riego de 145.676 m³. Comparando esta demanda con la capacidad real del sistema, se observa que el volumen de agua bombeado es aproximadamente nueve veces mayor que el requerido para satisfacer las necesidades del cultivo en ese día específico. Este resultado evidencia un importante margen de excedencia hídrica en la operación actual del sistema de bombeo

fotovoltaico, lo cual puede representar una oportunidad para ampliar la superficie cultivada, diversificar cultivos o incorporar estrategias de almacenamiento o distribución de agua.

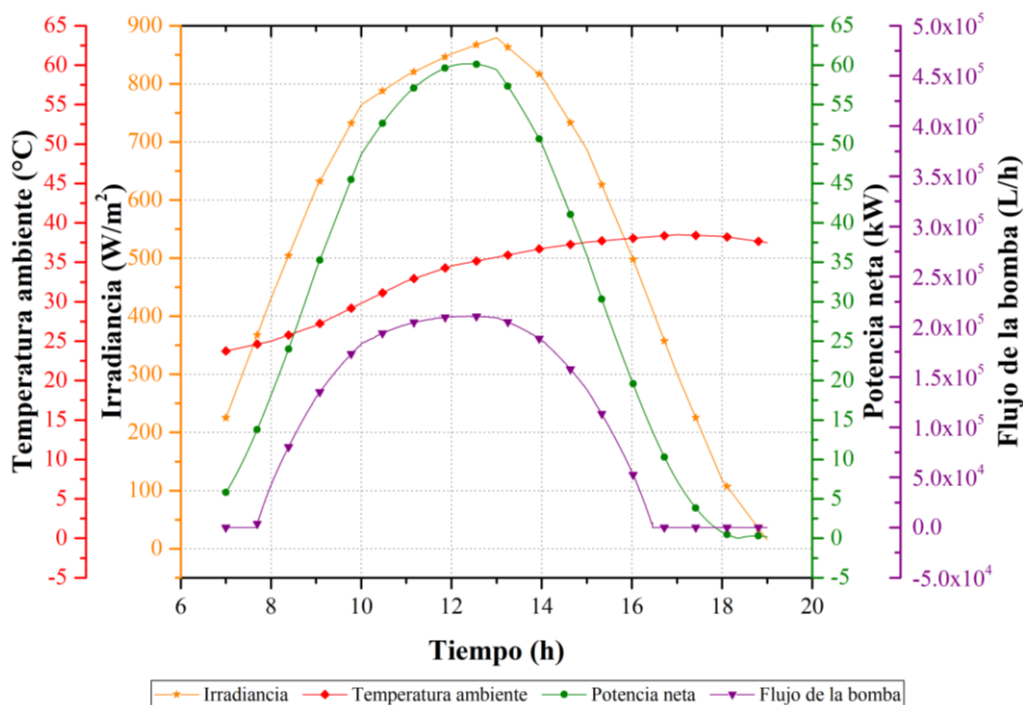


Figura 36. Dinámicas operativas del sistema fotovoltaico de bombeo actual en el solsticio de verano.

En el equinoccio de otoño (día 263, Figura 37) se observan comportamientos similares a los registrados durante el solsticio de verano, aunque con ciertas diferencias atribuibles a las condiciones estacionales. La temperatura ambiente presenta una tendencia creciente a lo largo del día, aunque con valores máximos menores que en verano. Por su parte, la irradiancia solar máxima registrada fue aproximadamente 720 W/m², lo cual permitió una generación fotovoltaica de 52 kW en el punto de mayor radiación. Esta potencia fue suficiente para alcanzar un flujo de bombeo de hasta 175,000 L/h.

Durante este día, el volumen total de agua bombeada fue de 1,065 m³, cantidad que supera en aproximadamente siete veces la demanda de riego correspondiente a los 15,800 m² de cultivo de palma datilera, la cual se estima en 137.302 m³. Esta capacidad excedente refuerza la evidencia sobre el sobredimensionamiento operativo del sistema en relación la demanda actual, lo cual sugiere la existencia de un margen técnico favorable para optimizar el uso del recurso hídrico, ya sea mediante una expansión del área agrícola, el riego de

cultivos adicionales o el aprovechamiento del excedente para otros fines productivos o comunitarios.

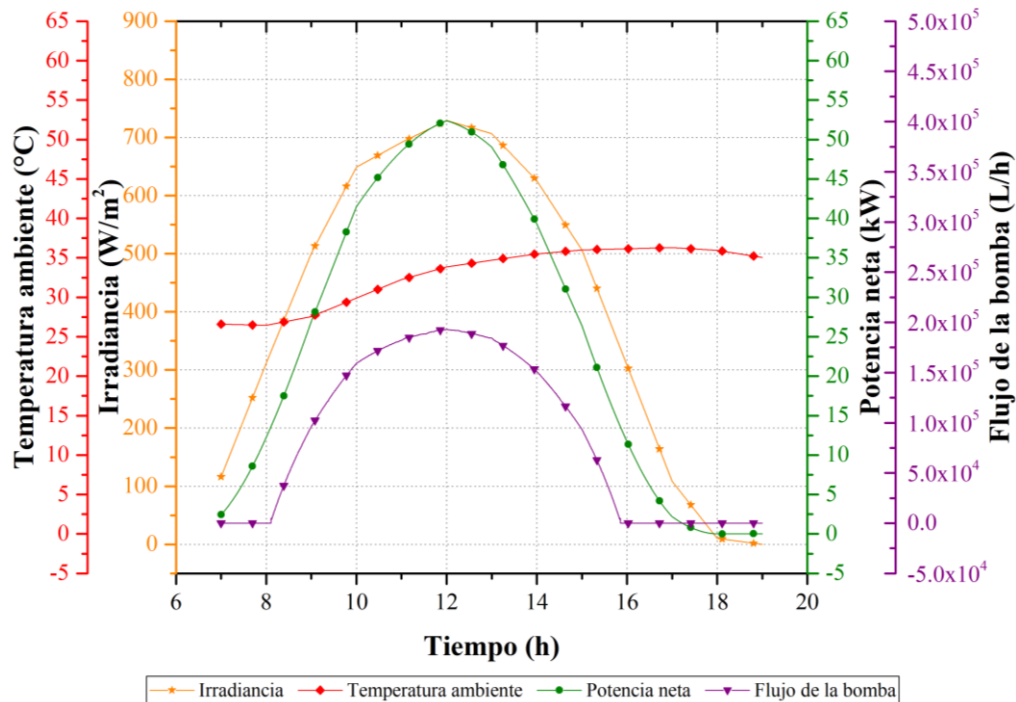


Figura 37. Dinámicas operativas del sistema fotovoltaico de bombeo actual en el equinoccio de otoño.

Finalmente, durante el solsticio de invierno (día 355, Figura 38), se registraron condiciones ambientales significativamente diferentes en comparación con los días previamente analizados. La temperatura ambiente mostró un descenso marcado, alcanzando un valor máximo de apenas 17 °C. Adicionalmente, a partir del mediodía se presentó nubosidad persistente, lo que provocó una disminución notable en los niveles de irradiancia solar. Este fenómeno alteró el perfil típico de distribución de la irradiancia, el cual generalmente presenta una forma casi simétrica en torno al mediodía solar.

A las 12:00 horas se alcanzó una irradiancia máxima de tan solo 500 W/m², lo que resultó en una generación fotovoltaica de aproximadamente de 34 kW. Esta potencia permitió alcanzar un flujo de bombeo cercano a los 125,000 L/h en ese momento. No obstante, debido a la disminución sostenida de la irradiancia y, por ende, de la potencia generada, la bomba cesó su funcionamiento alrededor de las 13:30 horas. Esto se debe a que la bomba

requiere una potencia mínima de activación de aproximadamente 13.59 kW, umbral que no pudo ser superado durante el resto del día debido a condiciones meteorológicas adversas.

Como resultado, el volumen total de agua bombeada durante el día fue de 377.97 m³. A pesar de esta limitación operativa, el sistema logró producir un volumen de agua equivalente a cinco veces la demanda de riego estimada para los cultivos de palma datilera (72.53 m³), lo cual demuestra que, incluso bajo condiciones climáticas desfavorables, el sistema conserva un margen operativo favorable.

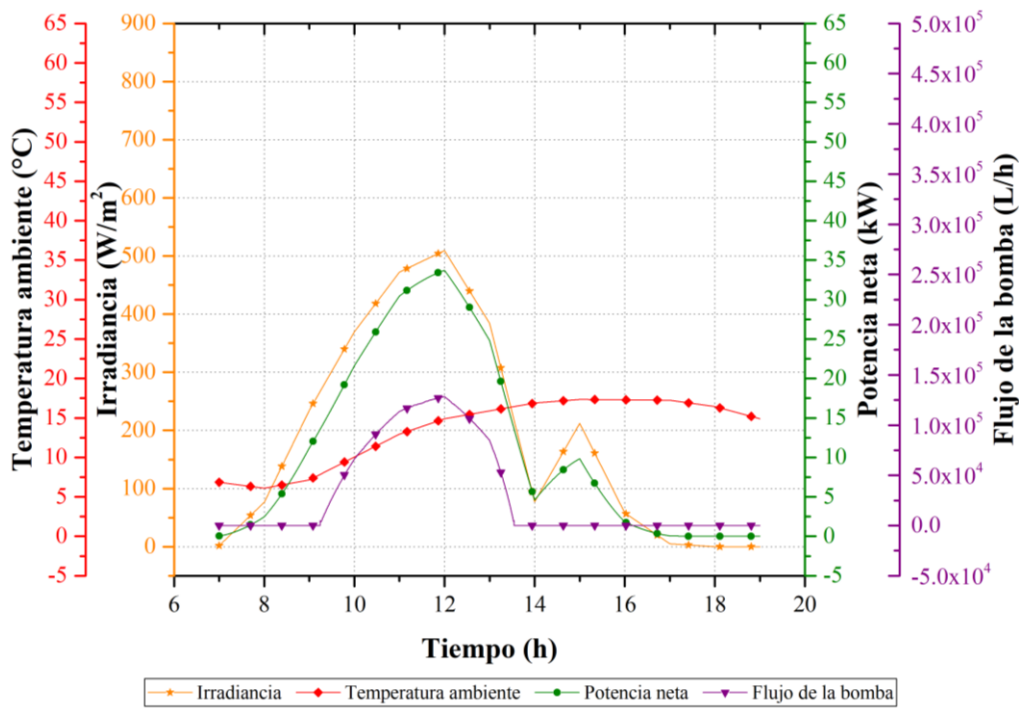


Figura 38. Dinámicas operativas del sistema fotovoltaico de bombeo actual en el solsticio de invierno.

4.2.2 Modelado de sombras.

Con el objetivo de evaluar la distribución teórica de la irradiancia bajo el sistema fotovoltaico, se analizó un arreglo compuesto por dos estructuras con 48 módulos conectados en serie y dos en paralelo, resultando en un total de 192 módulos fotovoltaicos. La simulación se realizó para los tres días representativos del año (solsticio de verano, equinoccio de otoño y solsticio de invierno) considerando tanto la irradiancia solar incidente como el área del suelo directamente cubierta por el sistema.

Para cada uno de estos días, se calculó la irradiancia promedio sobre la superficie del suelo en el intervalo horario de las 7:00 a las 19:00 horas, a fin de estimar el nivel de radiación disponible para los cultivos que pudieran establecerse bajo el sistema fotovoltaico. Esta información resulta fundamental para identificar qué especies agrícolas pueden desarrollarse adecuadamente en condiciones de sombra parcial, según sus requerimientos específicos de radiación, y por tanto, determinar la factibilidad técnica de implementar un esquema agrovoltaico en este contexto.

En la Figura 39(a) se presenta la distribución volumétrica de la irradiancia incidente sobre el plano donde se encuentra el sistema fotovoltaico, donde puede observarse que los volúmenes más amplios corresponden a valores de irradiancia reducidos. Esto indica una mayor frecuencia de baja radiación en aquellas zonas influenciadas por la sombra del sistema fotovoltaico. Por otro lado, la Figura 39(b) muestra la distribución espacial de dicha irradiancia sobre el plano analizado, permitiendo identificar claramente las zonas sombreadas y expuestas a lo largo del día.

Durante el solsticio de verano, los resultados de simulación indican que las áreas no afectadas por la sombra proyectada por el sistema fotovoltaico presentan una irradiancia promedio de aproximadamente 570 W/m^2 . En contraste, las zonas con mayor tiempo de exposición a sombra experimentan niveles significativamente menores, en torno a los 100 W/m^2 .

Esta diferencia se debe a la posición elevada del sol en esta época del año, lo cual ocasiona que la proyección de sombra del sistema fotovoltaico sea más corta y se desplace ligeramente hacia el sur sobre el plano de análisis.

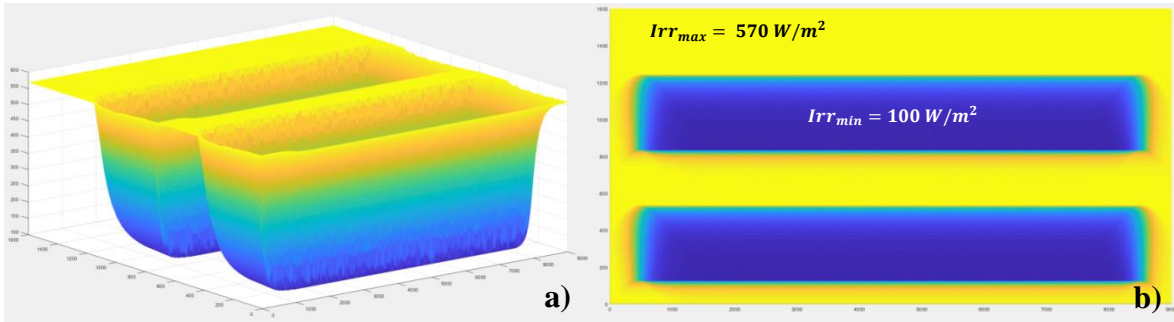


Figura 39. Predicción de la interacción de sombras para el solsticio de verano.

a) Valores de irradiancia bajo el sistema fotovoltaico. b) Distribución de la irradiancia en el campo.

Durante el equinoccio de otoño, los resultados de simulación muestran un comportamiento con menores niveles de irradiación entre los observados en el solsticio de verano. En la Figura 40(a) se observa que los volúmenes más amplios corresponden a valores de irradiancia reducidos, particularmente entre los 25 W/m² y 150 W/m², lo que indica una mayor presencia de zonas sombreadas a lo largo del día.

Por su parte, la Figura 40(b) presenta la distribución espacial de la irradiancia sobre el plano de análisis. Se aprecia una diferenciación clara entre las zonas con exposición solar directa y aquellas cubiertas por la sombra del sistema fotovoltaico. En este caso, la irradiancia máxima registrada en las áreas expuestas alcanza aproximadamente los 425 W/m², mientras que las zonas bajo sombra prolongada experimentan niveles mínimos de hasta 25 W/m².

Cabe señalar que, debido a la posición solar en esta época del año, la sombra proyectada por el sistema fotovoltaico se encuentra más centrada sobre el plano en comparación con el solsticio de verano. Esto resulta en una mayor superposición de sombras entre los arreglos, aumentando así la extensión de las áreas con irradiancia reducida.

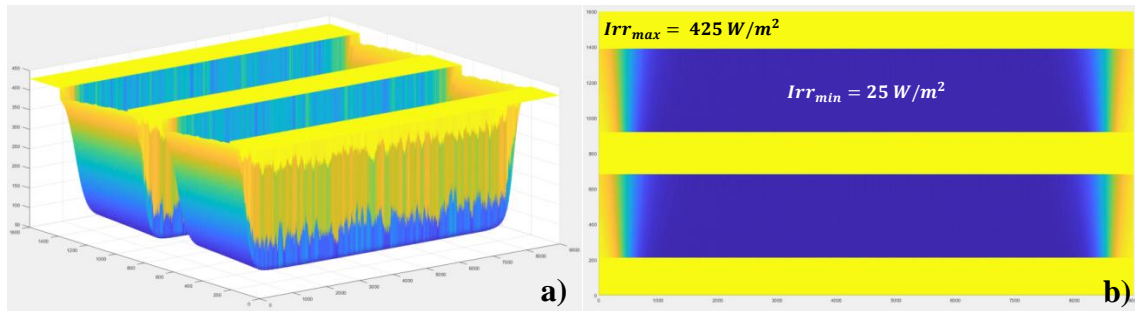


Figura 40. Predicción de la interacción de sombras para el equinoccio de otoño.

a) Valores de irradiancia bajo el sistema fotovoltaico. b) Distribución de la irradiancia en el campo.

En el solsticio de invierno, la posición baja del sol en el cielo da lugar a sombras más alargadas y desplazadas hacia el norte del plano de análisis. Como se muestra en la Figura 41(a), se identifican extensas zonas de baja radiación, particularmente bajo los arreglos fotovoltaicos, donde se alcanzan irradiancias mínimas cercanas a los 80 W/m². Por otro lado, en las áreas con exposición directa al sol, las irradiancias máximas se aproximan a los 200 W/m².

La Figura 41(b) permite observar la distribución espacial de la irradiancia sobre el plano, la distribución volumétrica de la irradiancia revela una alta concentración de volúmenes asociados a valores bajos de radiación, lo cual refleja una mayor proporción del área cubierta por sombra a lo largo del día.

Este patrón es consistente con las condiciones solares típicas de la temporada, en la que el ángulo de incidencia más bajo del sol provoca que las sombras proyectadas sean más largas y cubran una mayor superficie del terreno. Como resultado, el área útil para cultivo con alta disponibilidad de radiación se ve considerablemente reducida, lo cual debe considerarse al seleccionar especies agrícolas adaptadas a condiciones de baja irradiancia.

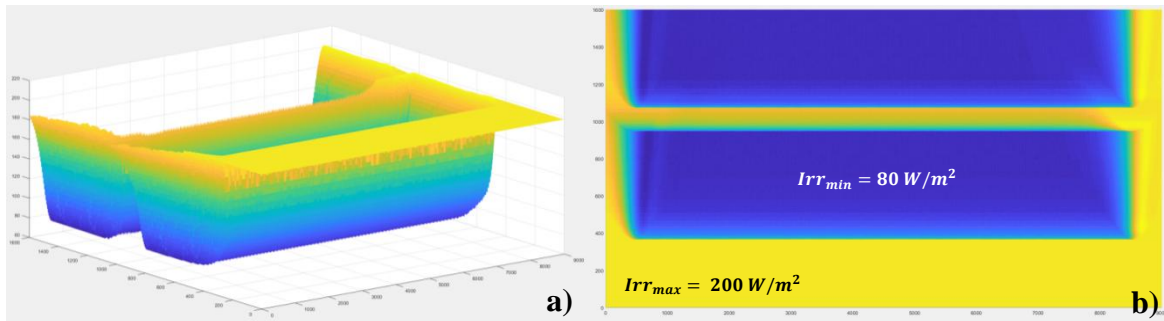


Figura 41. Predicción de la interacción de sombras para el solsticio de invierno.
a) Valores de irradiancia bajo el sistema fotovoltaico. b) Distribución de la irradiancia en el campo.

4.3 Desarrollo y dimensionamiento de propuestas para el sitio de estudio.

4.3.1 Determinación del arreglo fotovoltaico a implementar.

Para el diseño del sistema agrovoltaico integral, se utilizó el simulador de trayectoria solar y sombras con el objetivo de determinar el arreglo fotovoltaico que proporcionara una distribución adecuada de la radiación sobre la superficie de cultivo bajo los módulos. Esta evaluación permitió identificar cómo las distintas configuraciones de acomodo de los módulos afectan la radiación disponible para los cultivos, constituyendo un criterio fundamental para la selección del diseño óptimo del sistema.

Se definieron tres parámetros principales para generar las configuraciones de estudio: a) la disposición del módulo fotovoltaico, considerando orientación horizontal o vertical; b) el tipo de arreglo, ya sea convencional o tipo ajedrez; y c) el eje sobre el cual se variará la densidad agrovoltaica, es decir, la separación entre módulos en los ejes X (Este-Oeste), Y (Norte-Sur) o ambos, lo que permite evaluar la distribución espacial de los módulos en relación con la trayectoria aparente del sol.

La Figura 42 ilustra estos criterios de forma esquemática y sirve como referencia conceptual para interpretar las configuraciones evaluadas. En primer lugar, el arreglo convencional corresponde a una distribución uniforme de módulos, donde los paneles ocupan posiciones contiguas dentro del área considerada, formando un patrón “lleno” o continuo. En contraste, el arreglo tipo ajedrez introduce espacios alternados entre módulos (posiciones vacías intercaladas), generando un patrón discontinuo.

Adicionalmente, la figura distingue la orientación vertical y horizontal del módulo, definida por la relación entre sus dimensiones y su alineación respecto a los ejes del sistema de referencia. Tal como se muestra, un módulo en vertical presenta su dimensión mayor sobre el eje Y, mientras que en horizontal la dimensión mayor se dispone sobre el eje X. Esta distinción es relevante porque modifica la geometría proyectada de la sombra durante el día y, en consecuencia, la distribución de radiación bajo el arreglo. Finalmente, la flecha de referencia en la misma figura clarifica que la variación de densidad agrovoltaica puede imponerse aumentando la separación en X, en Y o en ambos ejes, lo cual permite explorar arreglos más “abiertos” o más “compactos” en función de la trayectoria aparente del sol.

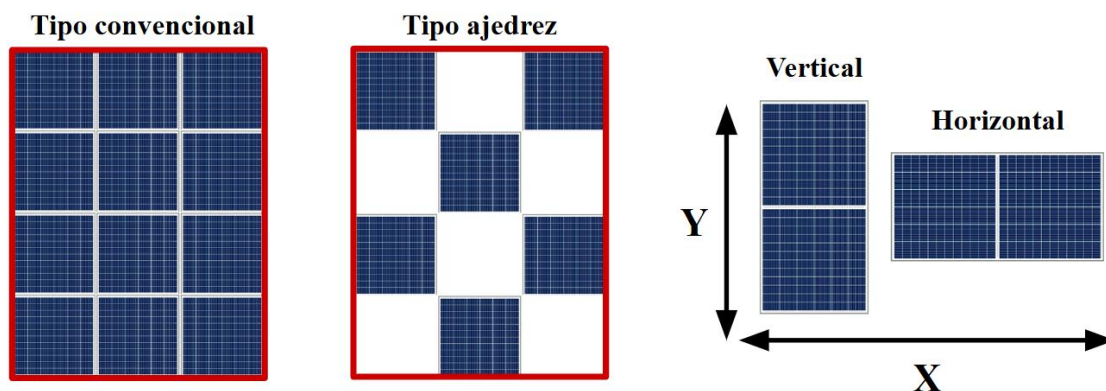


Figura 42. Esquema de configuraciones fotovoltaicas evaluadas: arreglo convencional y tipo ajedrez; orientación vertical y horizontal; y definición de ejes X–Y para la variación de la densidad agrovoltaica.

Con base en estos criterios, se propusieron cinco configuraciones de acomodo fotovoltaico:

1. Acomodo convencional, con módulos verticales, variando la densidad agrovoltaica en X y Y.
2. Acomodo convencional, con módulos horizontales, variando la densidad agrovoltaica en X.
3. Acomodo convencional, con módulos horizontales, variando la densidad agrovoltaica en X y Y.
4. Acomodo tipo ajedrez, con módulos horizontales, variando la densidad agrovoltaica en X.

5. Acomodo tipo ajedrez, con módulos verticales, variando la densidad agrovoltaica en X.

Estas configuraciones se evaluaron mediante el simulador para tres días representativos del año, seleccionados con el fin de capturar las condiciones extremas de radiación y sombra a lo largo de las estaciones. De esta manera, fue posible analizar cómo varía la radiación bajo los módulos según la disposición, el tipo de acomodo y la densidad agrovoltaica, estableciendo un criterio sólido para la elección del arreglo fotovoltaico más adecuado para la propuesta integral.

La Figura 43 muestra la distribución de la radiación bajo la configuración 1, correspondiente a módulos verticales con variación de la densidad agrovoltaica en los ejes X y Y, evaluada para tres días representativos del año (172, 263 y 355). Se observa que el patrón de sombra varía significativamente a lo largo del año, resultado del cambio estacional en el ángulo de altura solar.

En las densidades más altas (100% y 75%), la zona sombreada es más amplia y continua, lo que evidencia un mayor bloqueo de radiación directa y una cobertura eficiente del terreno. Sin embargo, incluso en estos casos se identifican franjas longitudinales de menor intensidad (tonos azul tenue), que reflejan una distribución de sombra no completamente uniforme. Este patrón se acentúa en las densidades intermedias y bajas (50% y 25%), donde se generan alternancias de luz y sombra, dando lugar a una radiación espacialmente heterogénea. Dicho comportamiento puede provocar variaciones locales en la temperatura y humedad del suelo, reduciendo la estabilidad del microclima, aspecto poco deseable en sistemas orientados a optimizar la protección de los cultivos. La configuración 1 demuestra que, si bien permite una cobertura amplia a densidades elevadas, su doble variación en X y Y genera una distribución de sombra menos constante y más dependiente de la época del año.

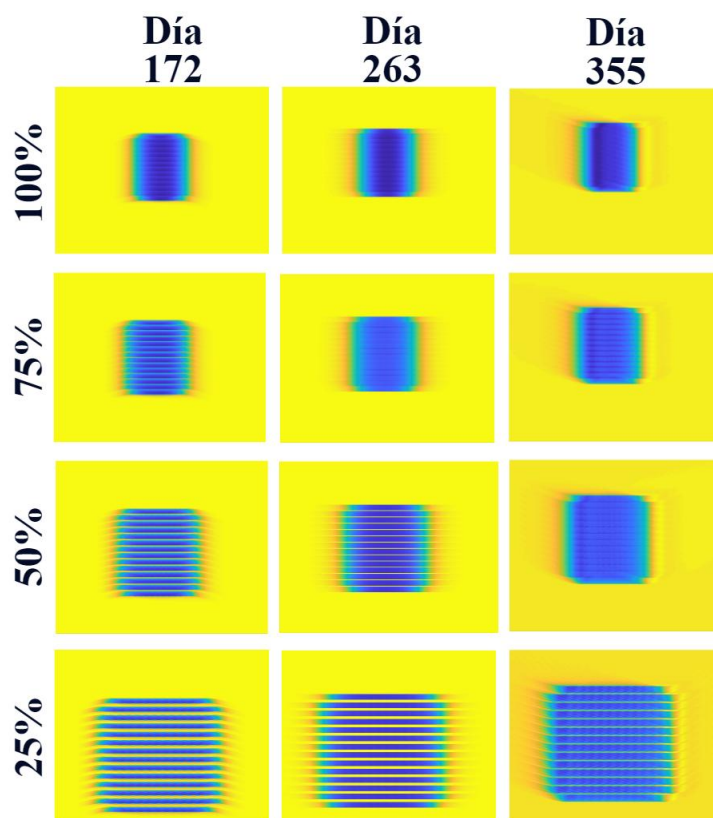


Figura 43. Distribución de la radiación debajo de la configuración 1 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.

La Figura 44 corresponde a la configuración 2, con módulos horizontales y variación de densidad agrovoltaica únicamente en el eje X. En este caso, el patrón de radiación presenta un comportamiento más regular y predecible. A medida que aumenta la densidad (de 25% a 100%), las zonas sombreadas se amplían y tienden a fusionarse, dando lugar a un manchón de sombra más uniforme y continuo, que reduce las áreas expuestas a radiación directa.

Particularmente en las densidades altas (100% y 75%), la sombra proyectada se mantiene constante y bien delimitada, favoreciendo una distribución homogénea de radiación sobre el terreno y condiciones más estables de temperatura y humedad. Las densidades intermedias y bajas (50% y 25%) permiten una mayor entrada de radiación, aunque sin generar la fragmentación pronunciada observada en la configuración anterior. Este comportamiento es más favorable para cultivos sensibles al calor o a la variabilidad lumínica, al ofrecer una cobertura más coherente con la trayectoria solar.

La comparación entre los tres días analizados evidencia la estabilidad longitudinal del patrón de sombra en la configuración 2, con una proyección más alargada hacia el solsticio de invierno (día 355) y más compacta en verano (día 172). Este comportamiento indica que el arreglo horizontal, al variar solo en X, sigue más fielmente la trayectoria aparente del sol y mantiene una sombra más uniforme a lo largo del año.

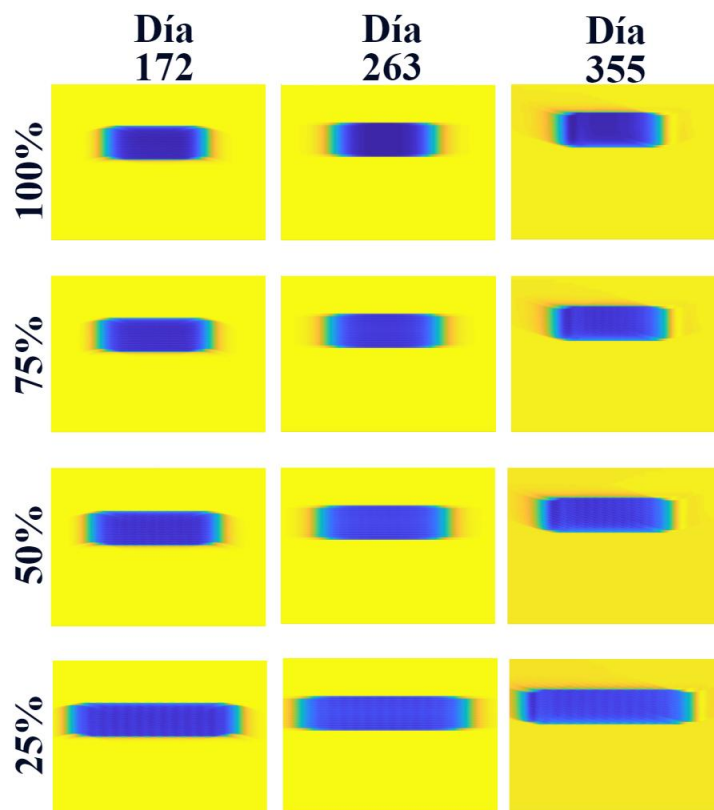


Figura 44. Distribución de la radiación debajo de la configuración 2 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.

Al evaluar la configuración 3, correspondiente a un acomodo convencional con módulos horizontales y variación de densidad agrovoltaica en los ejes X y Y se obtiene la Figura 45.

En la densidad del 100%, la cobertura de sombra presenta una homogeneidad aceptable, con una distribución amplia y continua que garantiza una protección relativamente uniforme del terreno. No obstante, al reducir la densidad al 75%, comienzan a manifestarse franjas alternadas de distinto tono de azul, indicativas de variaciones locales en la intensidad de radiación. Este fenómeno marca el inicio de una pérdida gradual de

uniformidad en la sombra, acentuada en las densidades intermedias y bajas (50% y 25%), donde la alternancia entre zonas iluminadas y sombreadas genera una distribución espacialmente heterogénea de la radiación.

En la densidad del 25% las franjas de sombra reflejan la separación física entre los módulos, de modo que el patrón de irradiancia adopta la forma estructural del sistema. Este comportamiento es relevante desde el punto de vista del diseño, pues evidencia una correspondencia directa entre la configuración del arreglo y la proyección de sombra; sin embargo, implica una exposición irregular del terreno que limita la creación de un microclima estable y homogéneo, condición deseable en un sistema agrovoltaico orientado a la protección térmica de los cultivos.

La configuración 3 demuestra que, aunque mantiene una cobertura adecuada en densidades altas, la doble variación en X y Y reduce la uniformidad del sombreado conforme disminuye la densidad. Este comportamiento indica que, si bien la configuración es funcional desde el punto de vista estructural, no favorece la homogeneidad lumínica para optimizar las condiciones agronómicas del sistema.

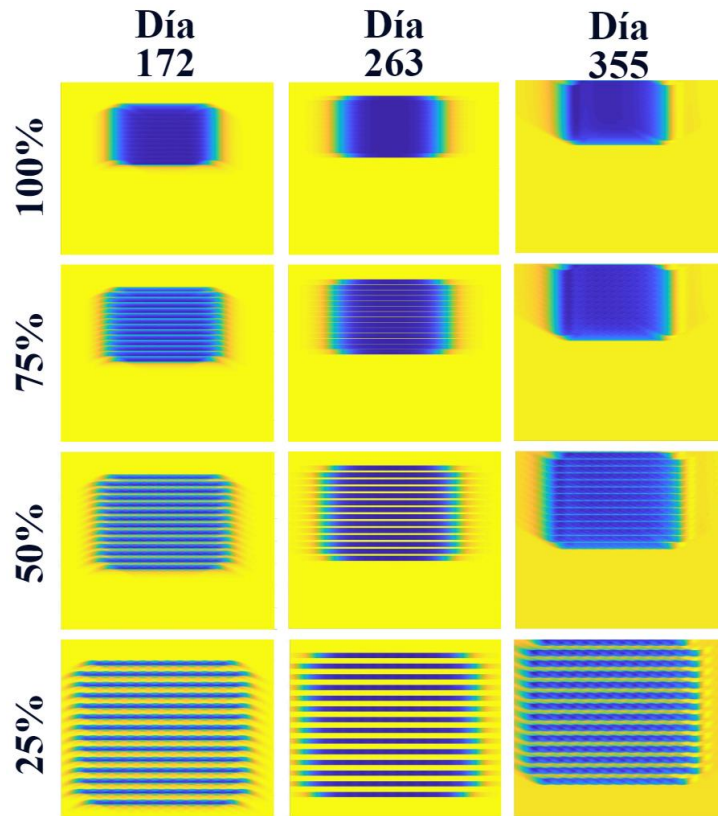


Figura 45. Distribución de la radiación debajo de la configuración 3 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.

La Figura 46 muestra la distribución de la radiación bajo la configuración 4, correspondiente al acomodo tipo ajedrez con módulos horizontales, con variación en el eje X. En esta configuración, el entrelazado característico del patrón ajedrezado genera una distribución compleja de la radiación, donde las zonas de sombra e iluminación se superponen de forma irregular. En las densidades más bajas (12% y 25%), se observa una gran heterogeneidad espacial, evidenciada por la presencia simultánea de tonos amarillos, azul intenso y azul tenue. Estos contrastes reflejan cambios abruptos en los niveles de irradiancia, indicando que ciertas regiones del terreno mantienen de forma persistente un nivel de radiación determinado a lo largo del día.

Al aumentar la densidad agrovoltaica (38% y 50%), la superficie sombreada se amplía, pero la irregularidad persiste: las tonalidades azules varían localmente y las franjas de transición entre sombra e iluminación permanecen definidas. A diferencia de otras

configuraciones, el acomodo tipo ajedrez no alcanza una homogeneidad significativa incluso en las densidades más altas, debido a la distribución discontinua e intercalada de los módulos, que provoca interferencias lumínicas constantes y un patrón de irradiancia fragmentado a lo largo del año. No obstante, durante el equinoccio de otoño, el entrelazado adopta un patrón de rayas más marcado, reflejando una orientación temporal de sombras que altera la distribución habitual del ajedrezado.

Aunque esta configuración incrementa el área sombreada al aumentar la densidad, no proporciona una cobertura uniforme ni estable, manteniendo una variabilidad espacial considerable en todos los casos.

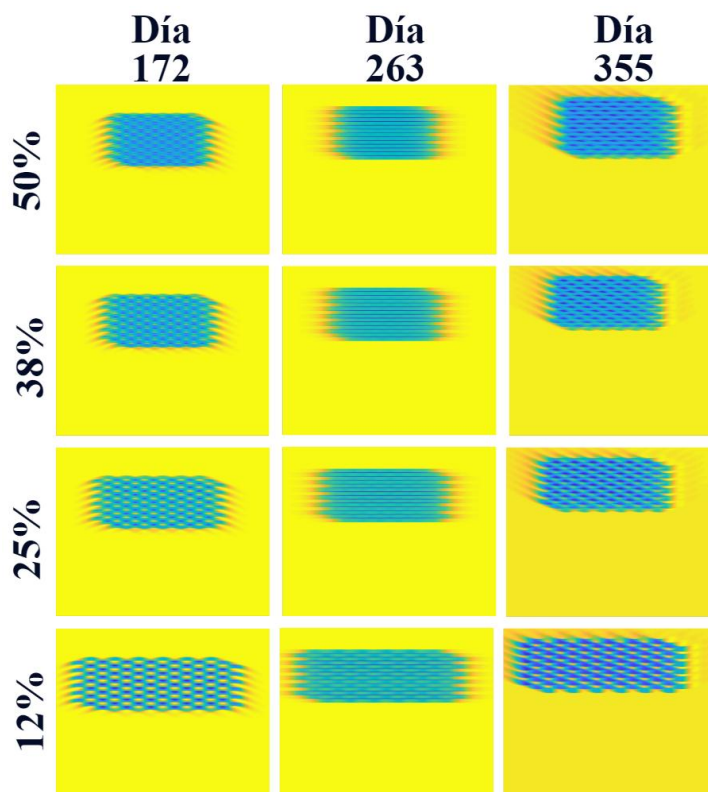


Figura 46. Distribución de la radiación debajo de la configuración 4 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.

La Figura 47 muestra la distribución espacial de la radiación global bajo la configuración 5, correspondiente al acomodo tipo ajedrez con módulos verticales, considerando una variación en la densidad agrovoltaica únicamente en el eje X.

En las densidades más altas (50% y 38%), la sombra proyectada se manifiesta en forma de franjas verticales bien definidas, que mantienen una estructura continua y simétrica. A lo largo del año, el patrón de franjas se conserva estable, con ligeros desplazamientos horizontales.

A medida que la densidad disminuye (25% y 12%), el patrón de sombra evoluciona hacia una configuración entrelazada característica del acomodo tipo ajedrez, resultado del mayor espaciamiento entre los módulos. Esta disposición permite una mayor penetración de radiación directa y produce una alternancia compleja de zonas iluminadas y sombreadas, especialmente visible en el día 355, correspondiente al solsticio de invierno. Sin embargo, durante el equinoccio de otoño (día 263), el patrón conserva su morfología en franjas verticales, lo que sugiere una alineación temporal del arreglo con la altura y trayectoria solar en esa época del año.

En la densidad más baja (12%) se observa una marcada heterogeneidad espacial, evidenciada por la presencia simultánea de tonos amarillos, azul intenso y azul tenue. Esta variabilidad refleja diferencias en la irradiancia incidente, donde algunas regiones permanecen expuestas de forma constante a la radiación directa, mientras que otras se mantienen bajo sombra parcial. Este comportamiento implica una distribución discontinua de la radiación, con posibles efectos diferenciados sobre la temperatura y la humedad del suelo.

La configuración 5 presenta un patrón de sombra no homogéneo y dependiente de la densidad y de la época del año. Aunque las densidades altas generan franjas más regulares, las diferencias de irradiancia entre zonas sombreadas e iluminadas persisten en todas las condiciones. Este comportamiento no garantiza una distribución uniforme de radiación.

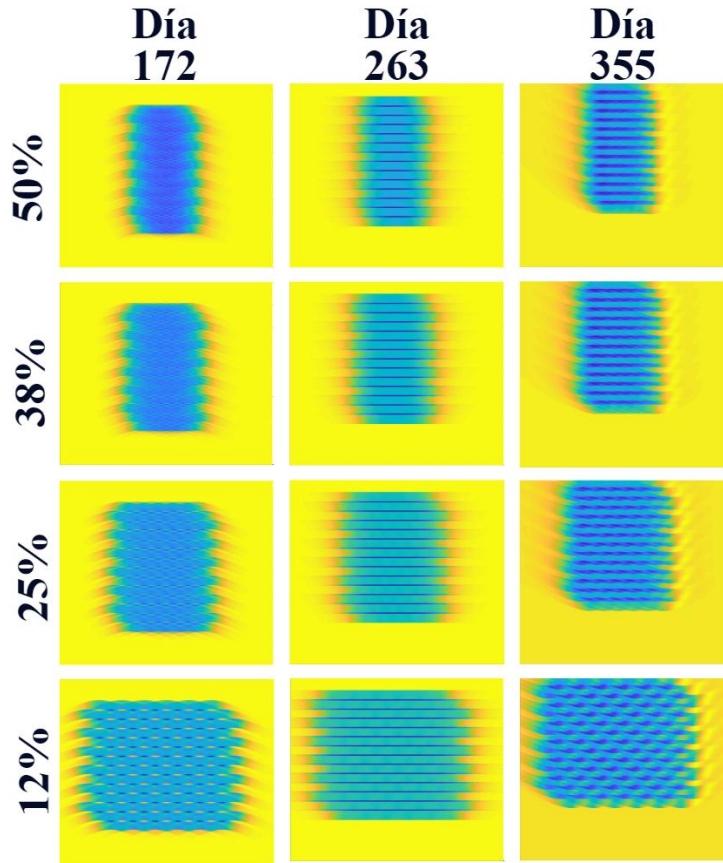


Figura 47. Distribución de la radiación debajo de la configuración 5 a diferentes densidades agrovoltaicas a lo largo del año.

A partir de los resultados obtenidos para las cinco configuraciones evaluadas, fue posible realizar un análisis comparativo general que permite identificar con mayor claridad las ventajas y limitaciones de cada disposición en términos de cobertura, homogeneidad y estabilidad del patrón de irradiancia.

El análisis comparativo de las cinco configuraciones evaluadas permite identificar con claridad las diferencias en el comportamiento de la radiación incidente bajo los módulos y, en consecuencia, su impacto sobre la uniformidad del sombreado en el terreno de cultivo. En todas las configuraciones se observó una relación directa entre la densidad agrovoltaica y el grado de cobertura; sin embargo, la combinación entre el tipo de acomodo, la disposición del módulo y el eje en el que se varía la densidad agrovoltaica determina de manera decisiva la homogeneidad del patrón de sombra.

Las configuraciones 1 y 3, ambas con doble variación en los ejes X y Y, mostraron una distribución irregular de la radiación conforme disminuyó la densidad. En estas configuraciones, la superposición de sombras en dos direcciones genera zonas con alternancias pronunciadas de luz y sombra, provocando una heterogeneidad espacial significativa. Este comportamiento se traduce en una distribución de la radiación desigual, lo que podría generar microzonas térmicas y diferencias en el desarrollo de los cultivos. Aunque la cobertura es amplia a densidades altas, la uniformidad de irradiancia se ve comprometida, por lo que no resultan las configuraciones más adecuadas para mantener un microclima controlado y estable.

Por su parte, las configuraciones tipo ajedrez (4 y 5) introducen una complejidad adicional en el patrón de irradiancia. En la configuración 4 (módulos horizontales), el entrelazado característico produce una distribución de radiación fragmentada, con zonas de sombra e iluminación que se alternan de forma irregular a lo largo del terreno. En la configuración 5 (módulos verticales), aunque el patrón presenta inicialmente franjas más definidas, estas representan distintos niveles abruptos de sombra conviviendo en el mismo espacio, al disminuir la densidad se transforma en un entramado entrelazado que acentúa la heterogeneidad espacial. En ambos casos, la uniformidad de la sombra es limitada, y la radiación no se distribuye de manera equilibrada entre los cultivos.

En contraste, la configuración 2, correspondiente a módulos horizontales con variación de densidad únicamente en el eje X, mostró el comportamiento más uniforme y estable entre todas las configuraciones analizadas. A medida que aumenta la densidad, las zonas sombreadas se amplían y tienden a fusionarse, dando lugar a un patrón de irradiancia continuo y predecible. Esta configuración sigue con mayor precisión la trayectoria aparente del Sol, generando un sombreado longitudinal constante y reduciendo la fragmentación observada en los demás arreglos.

El resultado es una distribución más homogénea de la radiación, que puede llegar a favorecer condiciones uniformes de temperatura y humedad sobre el terreno.

Por lo tanto, con base en los resultados del simulador y en el análisis comparativo de las configuraciones, se concluye que la configuración 2 presenta el mejor desempeño global.

Su capacidad para mantener una distribución de radiación uniforme a lo largo del año y su alineación coherente con la trayectoria solar la posicionan como la alternativa más eficiente para el diseño propuesto del sistema agrovoltaico.

4.3.2 Determinación de la densidad agrovoltaica a implementar.

El diseño de un sistema agrovoltaico eficiente requiere considerar no solo la generación eléctrica, sino también las necesidades fisiológicas de los cultivos que se desarrollarán bajo los módulos. Cada especie vegetal posee requerimientos específicos de Densidad de Flujo de Fotones Fotosintéticos (PPFD), los cuales influyen directamente en su crecimiento, productividad y tolerancia al estrés térmico. Asimismo, cada cultivo presenta periodos definidos de siembra y cosecha dentro del ciclo anual, que deben coincidir con una disponibilidad de radiación adecuada para garantizar un desarrollo óptimo.

En la Tabla 8 se resumen los valores de radiación requerida y las temporadas de crecimiento para distintos cultivos de interés en la región de Mexicali, Baja California. Estos rangos fueron tomados de la literatura especializada y expresados tanto en unidades de potencia (W/m^2) como en densidad de flujo fotosintético ($\mu mol/m^2/s$). Esta información constituye la base para establecer las densidades agrovoltaicas más apropiadas según las condiciones de irradiancia local.

Tabla 8. Cultivos representativos de México y sus requerimientos de radiación y periodos de desarrollo.

No.	CULTIVO	REQUERIMIENTO DE RADIACIÓN		REF	INICIO-FIN DE LA TEMPORADA (DIA JULIANO)
		Irradiancia (W/m^2)	PPFD ($\mu mol/m^2/s$)		
1	Maíz	70-211	324-975	[104]	91-241
2	Trigo	61-232	284-1070	[105]	335-150
3	Cebolla	47-90	218-415	[106]	1-211
4	Tomate	73-173	340-800	[105]	121-272
5	Brócoli	62-172	290-795	[107]	244-15
6	Calabacita	78-141	360-650	[108]	91-193
7	Lechuga	46-83	215-385	[109]	274-10
8	Zanahoria	40-87	185-405	[110]	274-110

9	Berenjena	49-125	230-580	[111]	274-39
---	-----------	--------	---------	-------	--------

Partiendo de los resultados obtenidos en la sección anterior, se seleccionó la configuración 2 como arreglo fotovoltaico óptimo para el sistema propuesto. Dicha configuración, conformada por módulos horizontales con variación de densidad en el eje X, demostró ofrecer la mayor uniformidad de irradiancia a lo largo del año. Con el fin de determinar la densidad ideal para las condiciones del Ejido Laguna Salada, se realizó una simulación anual del comportamiento de este arreglo bajo diferentes niveles de densidad agrovoltaica, obteniéndose la irradiancia promedio diaria bajo los módulos para cada día del año.

A partir de estos resultados se generó un mapa de color donde el eje X representa el día juliano, el eje Y la densidad agrovoltaica (%), y la escala de color indica la radiación media incidente bajo el arreglo. Sobre este mapa se superpusieron rectángulos representativos de cada cultivo, definidos según su periodo de desarrollo y su rango óptimo de radiación, conforme a los datos de la Tabla 8.

De esta forma, cada rectángulo abarca el intervalo temporal correspondiente a la temporada de cultivo (en el eje X) y el rango de radiación adecuado (en el eje Y), permitiendo identificar las zonas del gráfico donde la radiación disponible satisface simultáneamente las necesidades fotosintéticas y la cobertura deseada del sistema.

La Figura 48 muestra el resultado de esta integración. Se observa que los cultivos con altos requerimientos lumínicos, como maíz, brócoli y tomate, se concentran en las zonas de baja densidad agrovoltaica, donde la radiación disponible es más elevada. En contraste, especies con preferencia por condiciones sombreadas, como cebolla y zanahoria se ajustan mejor a densidades intermedias o altas, donde la cobertura de los módulos reduce la incidencia directa de radiación solar.

Al analizar de manera conjunta todos los cultivos, se identificó que una densidad agrovoltaica aproximada del 25% representa un punto de equilibrio óptimo. En este rango, la radiación bajo el arreglo fotovoltaico mantiene valores suficientes para la mayoría de las especies, al mismo tiempo que proporciona un nivel moderado de sombreado que contribuye a la mitigación térmica y al aprovechamiento energético del sistema.

Con base en el análisis realizado, se determinó que una densidad agrovoltaica del 25% ofrece las condiciones más favorables para el Ejido Laguna Salada. En este nivel de cobertura, la radiación disponible bajo los módulos se mantiene dentro de los rangos fotosintéticamente óptimos para trigo, berenjena, tomate, zanahoria, maíz y calabacita, lo que permite su desarrollo adecuado sin riesgo de exceso de irradiancia ni sombreado excesivo. Esta densidad representa un equilibrio entre el aprovechamiento fotovoltaico y el bienestar de los cultivos, favoreciendo la gestión integral del suelo agrícola en un entorno árido y con alta radiación solar.

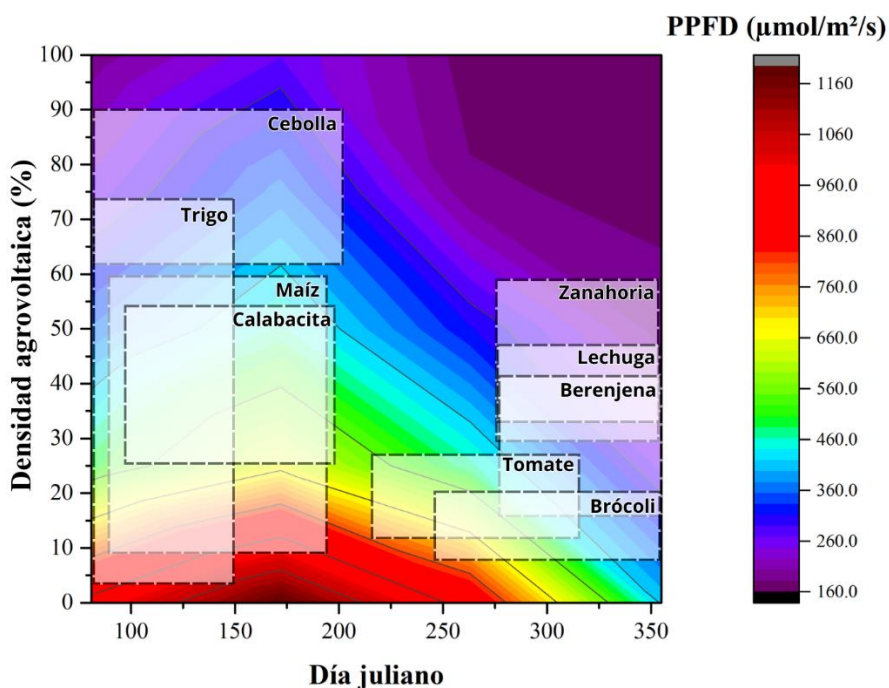


Figura 48. Radiación promedio anual bajo el arreglo fotovoltaico de la configuración 2 a diferentes densidades agrovoltaicas y superposición de requerimientos lumínicos por cultivo.

Para cuantificar el efecto del sistema agrovoltaico sobre el requerimiento hídrico de los cultivos seleccionados, se comparó la lámina bruta promedio alrededor de sus respectivas temporadas en dos escenarios: i) condición de referencia sin agrovoltaica (pleno Sol) y ii) condición con agrovoltaica, utilizando el arreglo agrovoltaico definido para el ejido. En esta comparación se mantuvieron constantes los supuestos del modelo, de modo que la única diferencia entre escenarios fuera la radiación disponible asociada al patrón de sombra del arreglo.

La Figura 49 presenta la comparación directa de lámina bruta para cada cultivo con y sin agrovoltaica. La tendencia es consistente en todos los casos: bajo agrovoltaica, la lámina bruta disminuye respecto a cielo abierto. En términos relativos, los mayores ahorros se observan en tomate (22.29%), calabacita (21.34%) y trigo (19.52%), seguidos de zanahoria (19.11%) y berenjena (16.20%). En contraste, maíz presenta una reducción menor (5.03%), lo que sugiere que, bajo los supuestos del modelo y el nivel de sombreado adoptado, su lámina bruta es menos sensible a la regulación de la radiación en comparación con el resto de los cultivos evaluados. Considerando el conjunto de alternativas, el ahorro medio estimado es de aproximadamente 17.25%, con un rango que va de 5.03% a 22.29%.

Este resultado es especialmente relevante, ya que una menor lámina bruta implica un menor volumen anual requerido por unidad de superficie cultivada y, en consecuencia, una presión reducida sobre el abastecimiento hídrico del sistema.

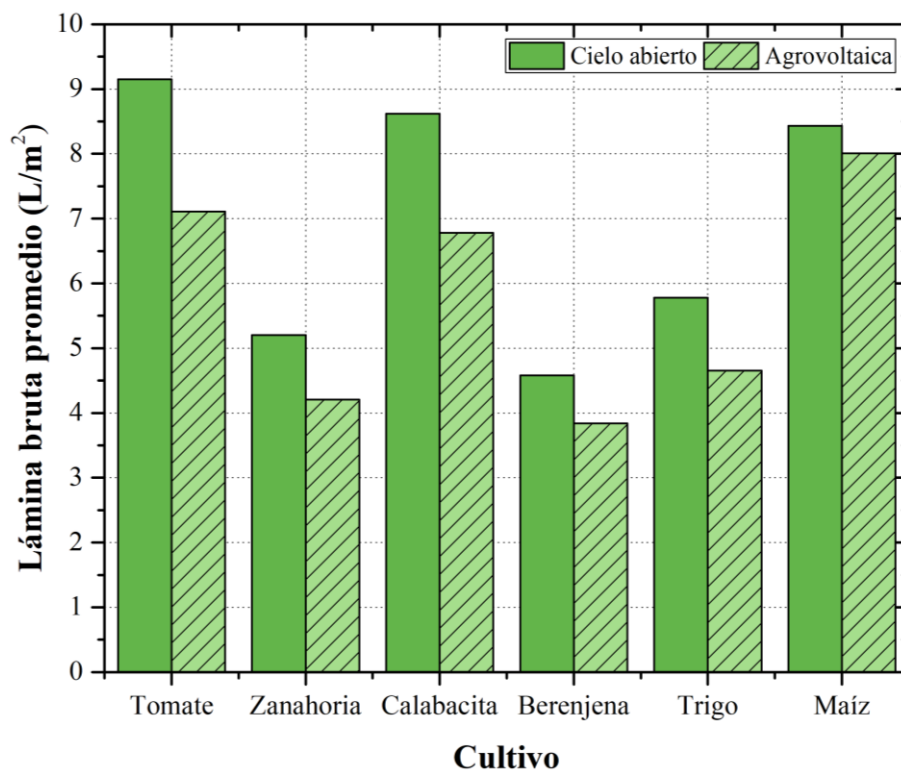


Figura 49. Comparación de lámina bruta para los cultivos evaluados bajo dos escenarios: sin agrovoltaica (pleno sol) y con agrovoltaica (arreglo seleccionado).

4.3.3 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de agua.

Dado que la infraestructura actual no incorpora almacenamiento hídrico, el riego depende directamente de la potencia fotovoltaica disponible en cada instante. Bajo este esquema “sin tanque”, cualquier periodo con baja irradiancia (p. ej., nubosidad) se traduce en reducción del caudal bombeado y, por ende, en un déficit acumulado de riego. La Figura 50 muestra con base a su operación anual, para el cultivo de palma datilera, la fracción de generación fotovoltaica destinada al bombeo y el déficit anual de riego, en función del área irrigada en los Huertos Familiares.

La curva verde evidencia que, conforme aumenta la superficie a regar, una fracción cada vez mayor de la energía fotovoltaica disponible debe asignarse al bombeo, hasta aproximarse a un régimen cercano al 90% para áreas de cultivo de $\approx 15\text{--}20$ ha. Este comportamiento indica que el bombeo se convierte progresivamente en la carga dominante del sistema, dejando un margen reducido para otras necesidades energéticas del ejido. En paralelo, la curva roja muestra que el déficit de riego anual crece de manera no lineal con el área irrigada, con un incremento particularmente marcado a partir de superficies intermedias, lo que sugiere que el sistema entra en una zona donde la disponibilidad energética y/o hidráulica deja de ser suficiente para sostener el riego requerido sin respaldo hídrico.

Un resultado relevante es que, incluso para áreas pequeñas, aparece déficit anual: con 0.5 ha se obtiene un déficit aproximado de $345.91\text{ m}^3/\text{año}$, atribuible a los días con baja irradiancia presentes en el archivo climatológico utilizado. Para la condición actual del ejido (1.58 ha), el esquema sin almacenamiento produce un déficit de $1,117.5\text{ m}^3/\text{año}$, mientras que el porcentaje de energía fotovoltaica destinado al bombeo es de aproximadamente 15.6%. En términos operativos, esto confirma que el riego no puede garantizarse únicamente con bombeo directo durante todo el año, aun cuando el promedio anual de recurso solar sea alto, porque el desempeño está condicionado por eventos de baja irradiancia.

En consecuencia, la Figura 50 respalda la necesidad de incorporar un tanque de almacenamiento como elemento de desacoplamiento entre la disponibilidad instantánea de generación fotovoltaica y la continuidad del suministro de agua para riego. En un contexto desértico, este almacenamiento funciona como reserva para cubrir episodios de nubosidad y evitar que el déficit se acumule; además, permite operar el bombeo de manera más eficiente cuando existe recurso solar, utilizando el excedente para reponer el volumen almacenado. Por tanto, el uso de almacenamiento hídrico no solo reduce el déficit anual, sino que mejora la confiabilidad del riego y la resiliencia del sistema ante variabilidad meteorológica.

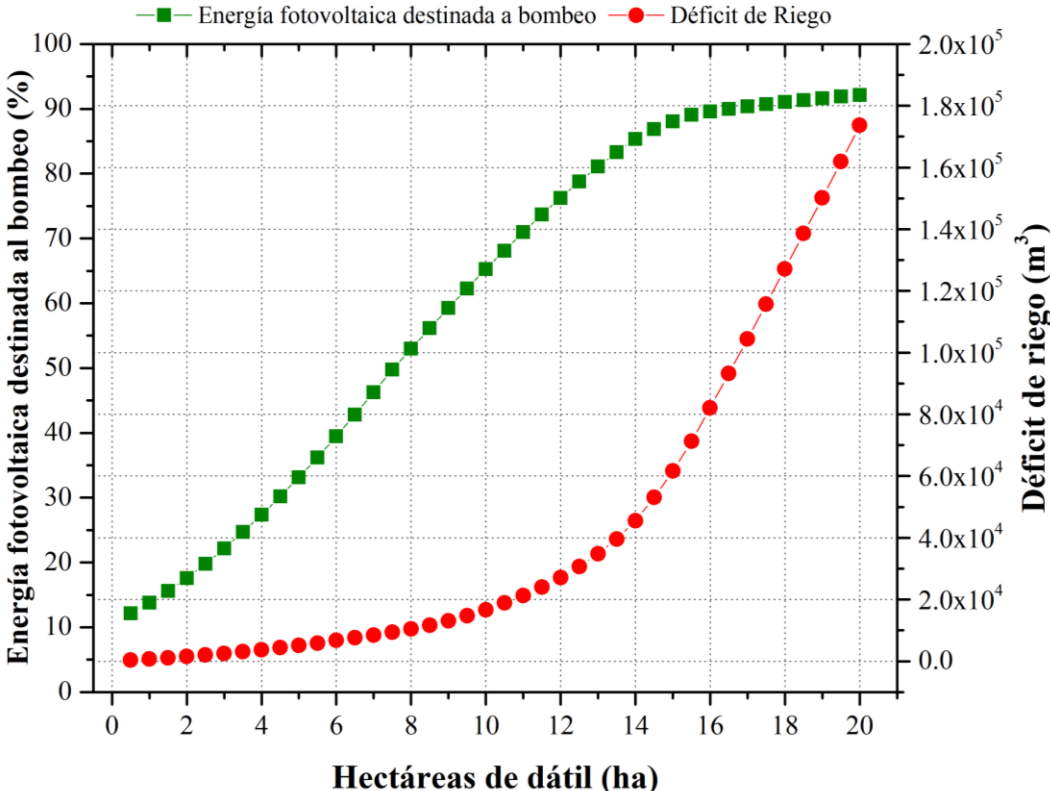


Figura 50. Fracción de generación fotovoltaica destinada al bombeo y déficit anual de riego en función del área irrigada (escenario sin tanque).

Aunque el caso base del Ejido Laguna Salada corresponde a 1.58 ha de palma datilera, se realizó un análisis complementario para explorar la escalabilidad del esquema de almacenamiento hídrico ante escenarios de mayor superficie irrigada. La Figura 51 presenta la capacidad de tanque requerida en función del área de dátiles, bajo la misma lógica

operativa del sistema y el mismo conjunto de condiciones meteorológicas empleadas en la simulación anual.

La tendencia creciente indica que, conforme aumenta el área irrigada, se incrementa el volumen de almacenamiento necesario para mantener la continuidad del riego durante periodos de baja irradiancia. Además, la forma no lineal de la curva sugiere que el requerimiento de almacenamiento crece de manera más acelerada para superficies mayores, lo cual es consistente con el hecho de que el volumen de agua demandado por el cultivo aumenta con el área y, por tanto, el volumen que debe cubrirse en contingencia también se amplifica.

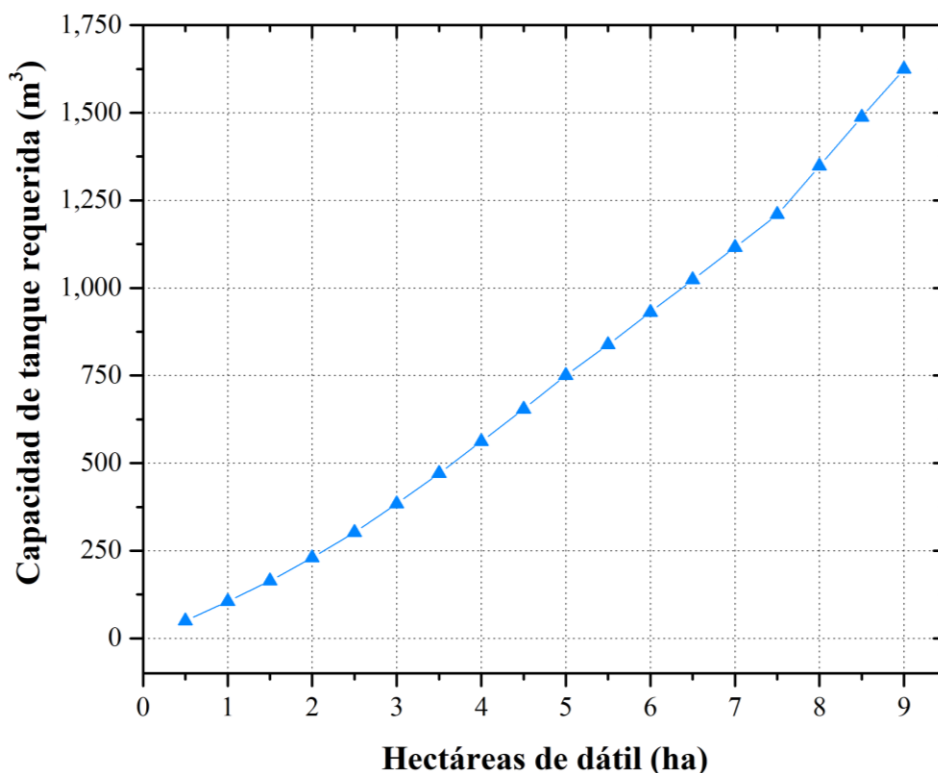


Figura 51. Sensibilidad del almacenamiento hídrico requerido ante incrementos del área irrigada de palma datilera (análisis de escalabilidad).

Para enfocar el análisis al caso real del ejido, en esta sección se mantiene fija el área actual de 1.58 ha de palma datilera y se incorpora, al requerimiento hídrico, un área adicional de 0.1584 ha de berenjena, correspondiente a su establecimiento bajo el sistema fotovoltaico existente en los Huertos Familiares, considerando una densidad agrovoltaica de 25%.

Adicionalmente, se incluye la demanda de agua para consumo humano, estimada en 0.1 m^3 por persona al día (OMS [112]). Suponiendo 20 viviendas con 4 personas por vivienda (80 personas en total), la demanda diaria resulta de $8 \text{ m}^3/\text{día}$. Con estas condiciones, se realiza una exploración de la capacidad del tanque y se evalúa el déficit anual de agua resultante bajo el escenario meteorológico anual simulado. La Figura 52 muestra una reducción progresiva del déficit conforme aumenta el almacenamiento, evidenciando que el tanque funciona como un elemento de respaldo operativo. En particular, se observa una zona de alta sensibilidad entre aproximadamente 175 y 182 m^3 (Figura 51), donde incrementos relativamente pequeños en la capacidad se traducen en disminuciones importantes del déficit; posteriormente, a partir de $\sim 182 \text{ m}^3$ el déficit se aproxima a cero y el beneficio de seguir aumentando el tanque se vuelve mínimo. Con base en ello, se adopta para el Ejido Laguna Salada una capacidad de 182.4 m^3 , ya que en este valor el déficit anual se elimina en el escenario simulado, representando una solución para garantizar continuidad de servicio. Desde el punto de vista energético, alcanzar esta condición implicó destinar 16.07% de la energía fotovoltaica al bombeo, proporción que cuantifica el esfuerzo energético requerido para asegurar el respaldo hídrico del sistema (riego y consumo humano) sin desplazar de forma dominante el suministro eléctrico a cargas comunitarias. En conjunto, la Figura 52 sustenta que un tanque de orden de 182.4 m^3 es suficiente para transformar el esquema sin tanque (vulnerable a nubosidad) en una operación anual robusta, volviéndola la capacidad de diseño para los Huertos Familiares del Ejido Laguna Salada en este estudio.

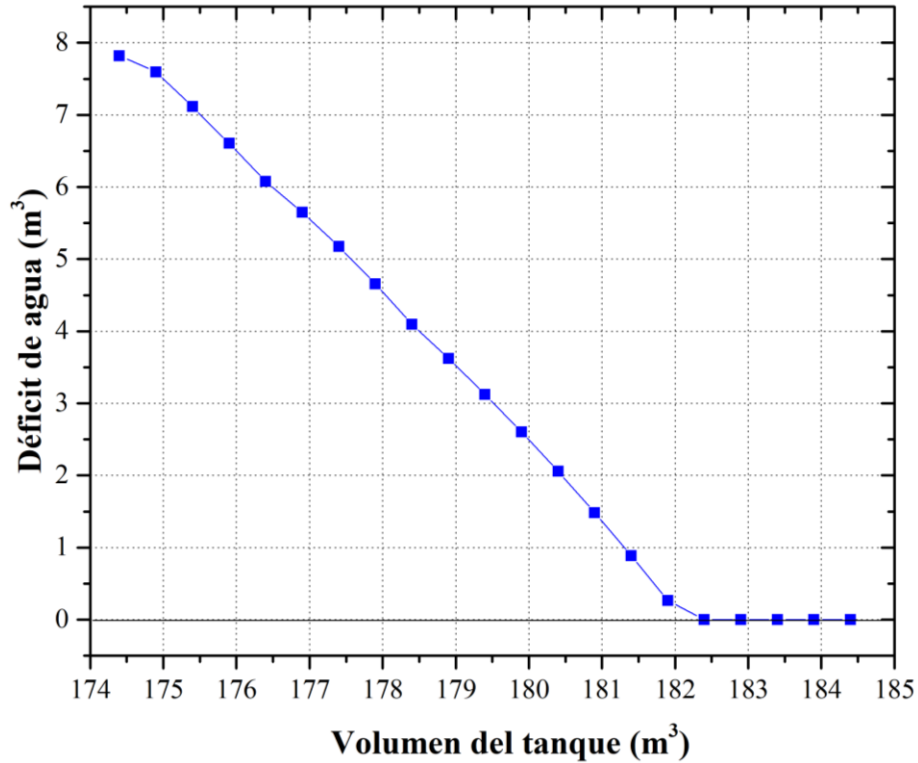


Figura 52. Dimensionamiento del tanque: déficit anual de agua vs capacidad de almacenamiento.

4.3.4 Dimensionamiento de la microrred.

El dimensionamiento de la microrred asociada al Ejido Laguna Salada se realiza a partir de un perfil horario anual de demanda eléctrica, construido para 20 viviendas. El perfil permite representar la variación temporal del consumo a lo largo del año y constituye la entrada principal para evaluar el desempeño del suministro bajo distintas configuraciones. Con base en dicho perfil, la energía anual demandada asciende a 91,810.41 kWh.

Para ejecutar el dimensionamiento y la evaluación económico-operativa de la microrred se adoptan las consideraciones resumidas en la Tabla 9, donde se presentan los parámetros empleados en el modelo, sus costos y las fuentes de información utilizadas. En particular, se incorpora un inversor híbrido como elemento de conversión y gestión de potencia dentro del bus eléctrico del sistema, y el banco de baterías se parametriza con sus valores nominales (tensión, capacidad, profundidad de descarga y corriente de carga/descarga) para representar el almacenamiento y su interacción con el controlador de carga. Adicionalmente, se incluye un generador diésel como fuente auxiliar de respaldo; su

inclusión se utiliza principalmente como referencia de potencia nominal y de costos (derivada de la disponibilidad de cotización en línea). De manera complementaria, se incorpora el costo del diésel y su tasa de actualización anual como insumos del análisis económico, junto con el periodo de análisis considerado.

Tabla 9. Consideraciones técnicas y económicas para el dimensionamiento de la microrred.

Elemento	Parámetros usados en el modelo	Costo	Fuente
Inversor híbrido SORL-ARK	$P_{nom} = 60 \text{ kW};$ $\eta_{inv} = 97.5\%$	18,408.82 USD	Ficha técnica (Anexo F) + cotización en línea
Baterías BOS-GM5.1-D	$V_{nom} = 51.2 \text{ V};$ $R_{cap} = 100 \text{ Ah};$ $DoD = 90\%;$ $I_{C/D} = 50 \text{ A}$	227.07 USD/kWh	Ficha técnica (Anexo F) + cotización en línea
Generador diésel	$P_{nom} = 60 \text{ kW}$ ($\approx 75 \text{ kVA}$)	25,725.4 USD	Cotización en línea
Diésel [113]	Inflación = 4.92%/año	0.4166 USD/kWh	Comisión Reguladora de Energía (CRE)
Periodo de análisis	$N = 10 \text{ años}$	N/A	Ficha técnica (Anexo F)

Con el fin de dimensionar el almacenamiento eléctrico de la microrred, se realizaron simulaciones anuales variando la capacidad del banco de baterías haciendo uso de la potencia remanente al satisfacer las necesidades hídricas agrícolas y de consumo del ejido, evaluando la cobertura de la demanda eléctrica comunitaria mediante el inversor y el banco de baterías. La Figura 53 muestra la evolución conjunta de la fracción solar del sistema y la energía anual aportada por el generador auxiliar. Como es esperable, al incrementar la capacidad de almacenamiento aumenta la fracción solar y disminuye el aporte del auxiliar, ya que el banco permite desplazar excedentes fotovoltaicos hacia periodos sin generación (principalmente nocturnos y episodios de baja irradiancia). No obstante, el comportamiento exhibe rendimientos decrecientes: para capacidades bajas y medias se observa una mejora marcada, mientras que a partir de $\sim 150 \text{ kWh}$ la fracción solar tiende a estabilizarse (≈ 0.63 – 0.64) y el aporte del auxiliar converge a un valor prácticamente constante. Esto sugiere que, bajo las condiciones meteorológicas del año simulado y la configuración fotovoltaica

considerada, aumentar el banco por encima de ese rango aporta beneficios marginales reducidos en cobertura anual, por lo que ~150 kWh constituye una referencia práctica de dimensionamiento para el almacenamiento de la microrred en este caso de estudio.

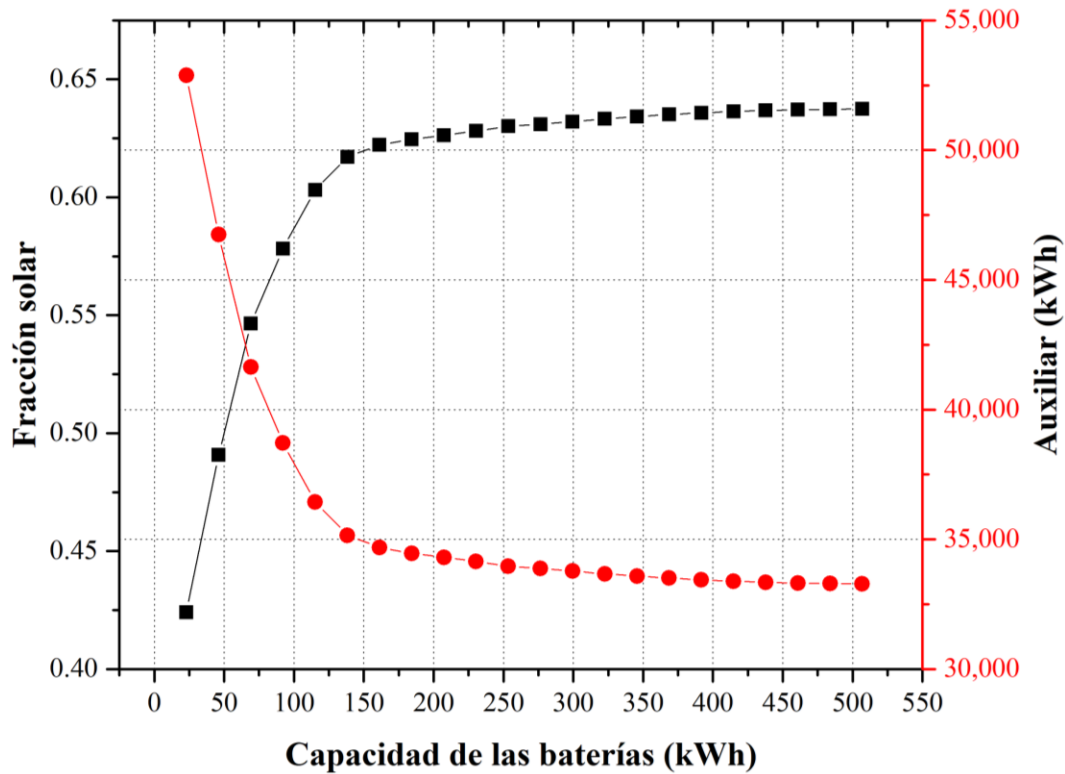


Figura 53. Fracción solar y aporte anual del auxiliar vs capacidad del banco de baterías.

Para analizar con mayor detalle las dinámicas de operación, se seleccionó un día representativo del año (día 172, correspondiente al periodo de mayor exigencia hídrica y alta demanda energética) y se evaluaron tres configuraciones de almacenamiento: subdimensionado, cercano al umbral de saturación y sobredimensionado.

En este primer caso, el banco de baterías se fija en 25.6 kWh, que representa un escenario subdimensionado. En la Figura 54 se muestra la potencia fotovoltaica del sistema agrovoltaico (verde), la demanda eléctrica del ejido (rojo), la potencia suministrada a través del inversor (morado) y la potencia del generador auxiliar (gris), todas referidas al eje izquierdo; el estado energético del banco de baterías (naranja) se presenta en el eje derecho. Para esta simulación se consideró que el banco inicia el día completamente cargado, con el

fin de observar su capacidad real para sostener la operación durante las horas sin irradiancia.

Al inicio del día, cuando la generación fotovoltaica es nula o aún insuficiente, el suministro eléctrico recae brevemente en el banco de baterías, lo cual se refleja en el empate temporal entre la demanda (rojo) y la salida del inversor (morado). Sin embargo, debido a la baja capacidad del banco, la energía almacenada se agota en poco tiempo y el generador auxiliar entra en operación, manteniendo el balance al cubrir la demanda (se observa cómo la potencia del auxiliar se ajusta para sostener el suministro cuando el inversor ya no puede igualar por sí solo la demanda). En este régimen, el banco permanece prácticamente descargado, evidenciando que su capacidad resulta insuficiente para amortiguar periodos prolongados sin recurso solar.

Cuando la potencia fotovoltaica alcanza el umbral mínimo de operación del bombeo (13.59 kW), se activa el riego; su ventana de operación se identifica por las líneas verticales punteadas, aproximadamente entre las 8:00 y las 11:00 h. Durante este intervalo, el sistema enfrenta una condición más exigente porque debe atender simultáneamente el consumo eléctrico y el requerimiento de bombeo. En consecuencia, se observa un funcionamiento combinado en el que parte de la energía proviene del arreglo fotovoltaico y el resto es complementado por el auxiliar, especialmente en los momentos en que la generación no logra cubrir de forma simultánea ambas demandas.

Conforme avanza la mañana y la irradiancia aumenta, la generación fotovoltaica comienza a superar la demanda eléctrica instantánea y se habilita nuevamente la carga del banco. No obstante, al tratarse de un almacenamiento reducido, las baterías alcanzan rápidamente su capacidad máxima (25.6 kWh) y permanecen saturadas durante varias horas, lo que indica que existe excedente fotovoltaico que no puede almacenarse adicionalmente bajo esta configuración. Finalmente, al disminuir la irradiancia por la tarde, la potencia fotovoltaica cae abruptamente y el banco vuelve a descargarse con rapidez, forzando la entrada del auxiliar durante el resto de la noche para sostener el suministro. Este comportamiento se refleja en la fracción solar anual reducida, que para este escenario toma un valor de 0.42,

consistente con un sistema donde el almacenamiento no es suficiente para desplazar energía solar hacia periodos nocturnos o de baja irradiancia.

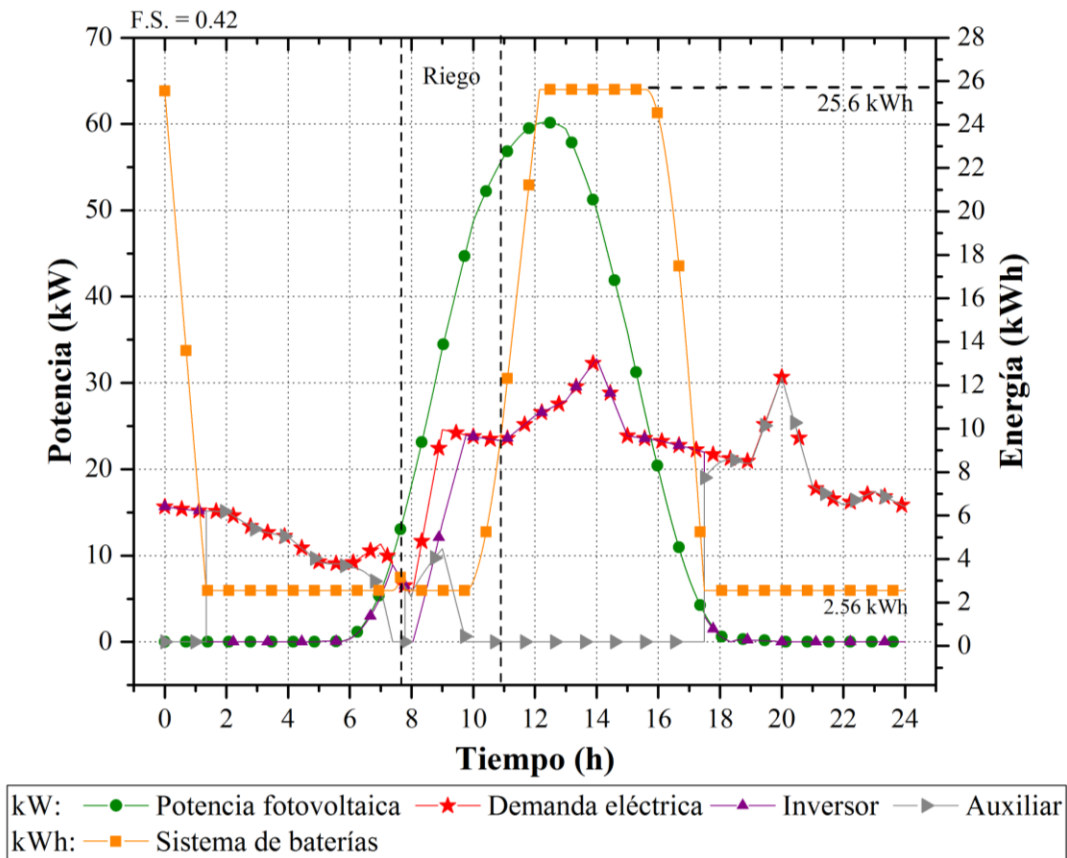


Figura 54. Dinámica diaria de la microrred para un banco de baterías subdimensionado (25.6 kWh).

En la Figura 55 se observa que el banco inicia cargado (condición inicial de simulación), por lo que durante la madrugada (0~7 h) la demanda eléctrica (rojo) se cubre principalmente mediante el inversor (morado) alimentado por el banco de baterías (naranja), reflejándose en una descarga progresiva del almacenamiento. A diferencia del banco pequeño, aquí la batería sí tiene “espalda” suficiente para sostener la demanda varias horas antes de requerir apoyo significativo del auxiliar, lo que reduce el consumo nocturno de diésel y mejora la fracción solar anual.

Alrededor de ~7–8 h comienza a aparecer potencia fotovoltaica (verde) y, cuando se cumple el umbral de activación de la bomba (13.59 kW), se activa el periodo de riego (delimitado por las líneas verticales punteadas). En esa franja, el sistema opera en un régimen mixto: parte de la potencia fotovoltaica se destina al bombeo y otra parte al

suministro eléctrico, mientras el banco actúa como amortiguador para suavizar desbalances instantáneos. Esto se aprecia en que, al inicio del riego (cuando la producción fotovoltaica aún va en ascenso), el almacenamiento continúa; conforme la irradiancia aumenta y el arreglo alcanza mayor potencia, el balance se invierte y el banco deja de caer y comienza a recuperarse.

Posteriormente, durante el bloque central del día (~10–16 h), la potencia fotovoltaica domina el despacho: la curva verde alcanza su máximo y el banco se recarga con rapidez hasta aproximarse a su capacidad (naranja sube hacia el tope). En este tramo, la demanda puede satisfacerse principalmente con energía solar y el uso del auxiliar se reduce notablemente, lo cual es consistente con el valor anual de fracción solar F.S. = 0.61 reportado en la figura. Ya con el banco recuperado, el sistema queda mejor preparado para cubrir el periodo nocturno.

Hacia el atardecer (~16–18 h) la potencia fotovoltaica decrece hasta prácticamente cero, y a partir de ahí la demanda vuelve a ser atendida por el inversor usando el almacenamiento: la curva naranja entra en fase de descarga y, de forma importante, el banco permite atravesar la noche con mucha menor dependencia del auxiliar que en el Caso 1 (capacidad de 25.6 kWh). Incluso ante incrementos de demanda en la tarde-noche (se observa un evento de mayor potencia alrededor de ~20 h), el almacenamiento ayuda a sostener el suministro; finalmente, cuando el nivel del banco se aproxima a cero hacia el cierre del día, el auxiliar entra para cubrir el remanente nocturno.

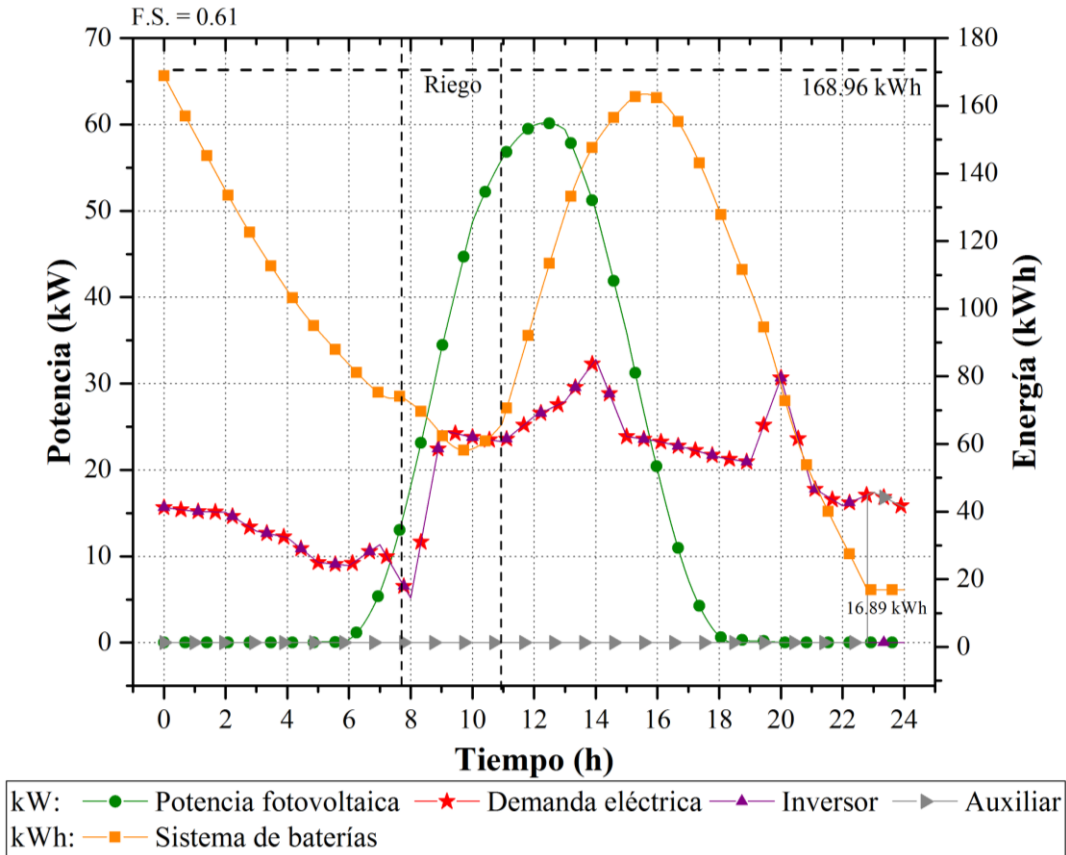


Figura 55. Dinámica diaria de la microrred para un banco de baterías cercano al ideal (168.96 kWh).

En el tercer escenario se evalúa un banco de baterías de 389.12 kWh, asumiendo (igual que en los casos anteriores) que el día inicia con el almacenamiento en un nivel alto. En la Figura 56 se observa que, durante la madrugada, cuando la potencia fotovoltaica es nula, el sistema mantiene el suministro a la demanda eléctrica principalmente mediante descarga del banco, lo cual se refleja en la disminución gradual del contenido energético. A diferencia del caso subdimensionado, aquí la descarga ocurre de forma sostenida sin vaciar rápidamente el almacenamiento, por lo que el sistema evita (o reduce al mínimo) la entrada temprana del auxiliar.

Conforme avanza la mañana y comienza a incrementarse la generación fotovoltaica, el inversor acompaña la entrega hacia las cargas y, al mismo tiempo, el excedente disponible se utiliza para recuperar el nivel energético del banco. En el intervalo de riego el sistema destina una fracción importante de la potencia fotovoltaica al bombeo, así que el banco de

baterías compensa variaciones y mantiene el suministro eléctrico sin depender de manera marcada del auxiliar, incluso mientras ocurre el evento de riego.

Después del mediodía, cuando la potencia fotovoltaica se aproxima a su máximo diario, se aprecia que el banco alcanza nuevamente un nivel alto. A partir de ese punto, durante la tarde, la disminución de la generación fotovoltaica provoca que el sistema transite a un modo en el que el banco cubre el déficit entre la demanda y la generación, observándose una descarga gradual hasta la noche. Incluso cuando aparece el incremento de demanda en horario nocturno, el almacenamiento aporta potencia para mantener la entrega del inversor igual a la demanda, eliminando la necesidad de respaldo del auxiliar.

En términos de desempeño, bajo este esquema de baterías, la fracción solar anual ≈ 0.63 , muy similar a la alcanzada en el caso cercano al umbral. Esto es consistente con el comportamiento de rendimientos que casi no cambian observado en la Figura 55: aunque el banco sobredimensionado mejora la capacidad de cubrir periodos sin sol y suaviza la operación diaria, la ganancia marginal en fracción solar respecto al banco de 168.96 kWh es pequeña, indicando que, bajo la disponibilidad fotovoltaica y la demanda del escenario anual simulado (con potencia ya comprometida al riego), el sistema se encuentra limitado principalmente por la energía solar disponible y no por capacidad adicional de almacenamiento.

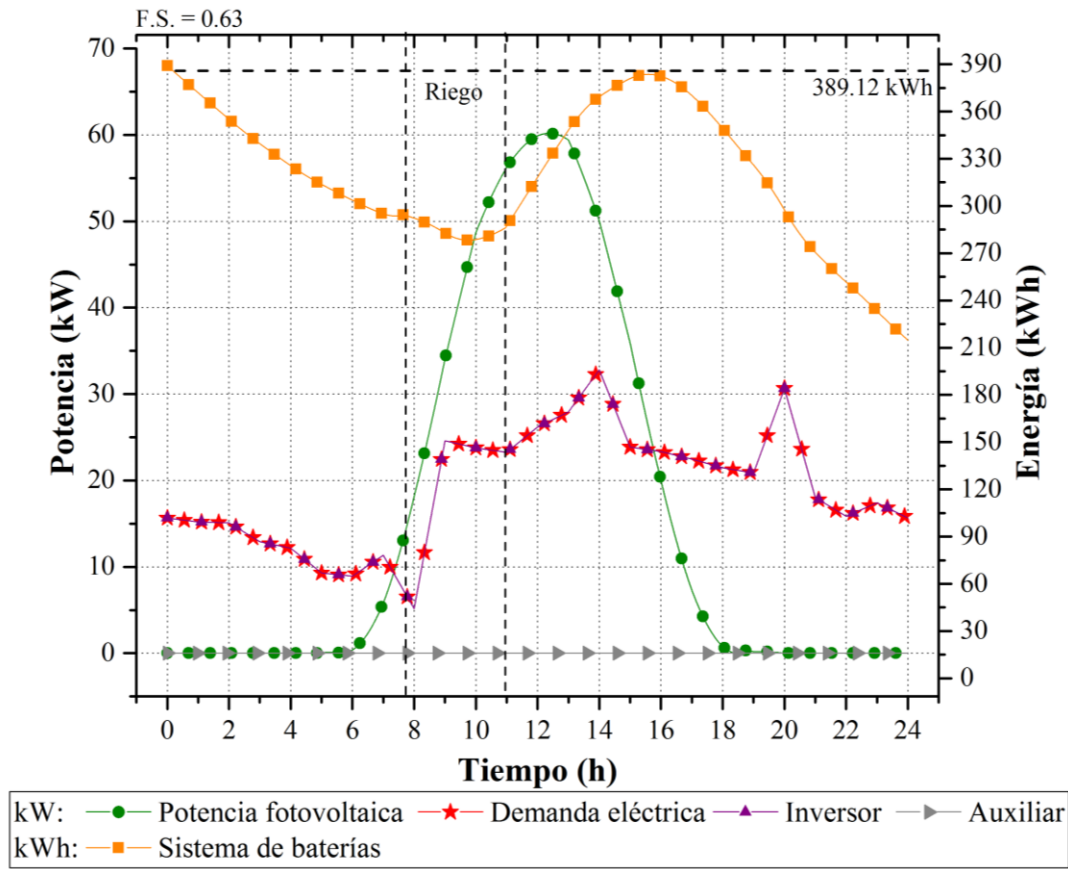


Figura 56. Dinámica diaria de la microrred para un banco de baterías sobredimensionado (389.12 kWh).

Con base a la exploración anual mostrada en la Figura 53 y los escenarios de capacidad de baterías (Figura 54, Figura 55 y Figura 56), se identificó que el desempeño energético de la microrred presenta aumentos de rendimiento muy bajos a partir de un banco del orden de ~150 kWh: más capacidad sigue aumentando ligeramente la fracción solar, pero ya no reduce de manera importante la energía del auxiliar. Por ello, el siguiente paso no es seguir aumentando la capacidad de las baterías, sino seleccionar una capacidad razonable comparando el impacto económico de cada alternativa. Para esta comparación se estimó el costo específico de la microrred (USD/kWh) en un periodo de 10 años, consistente con el periodo típico de recambio del banco de baterías. En el cálculo se consideran los costos y parámetros de la Tabla 9 (costos de inversión de baterías, inversor y generador), además del costo del diésel como gasto operativo dominante cuando el auxiliar entra en operación; el arreglo fotovoltaico no se incluye como inversión porque corresponde a infraestructura ya

existente en el ejido y el interés es cuantificar el efecto económico del almacenamiento y el respaldo sobre el suministro anual.

La Figura 57 muestra que el costo unitario equivalente de la microrred (USD/kWh) responde a un compromiso inversión–operación, donde la capacidad del banco de baterías determina el grado de dependencia del generador auxiliar durante las horas sin disponibilidad solar. Para capacidades reducidas de almacenamiento, el sistema recurre de manera intensiva al generador diésel, lo que eleva el costo total debido al predominio del gasto operativo; en este extremo, el costo alcanza valores elevados tanto sin considerar inflación del diésel como bajo un escenario inflacionario.

Al incrementar la capacidad del banco, los excedentes fotovoltaicos se almacenan y desplazan hacia los periodos nocturnos, reduciendo la energía anual suministrada por el generador auxiliar y provocando una disminución progresiva del costo unitario. En el escenario sin inflación del diésel, este balance se optimiza con una capacidad de baterías de 128 kWh, donde se alcanza un costo mínimo de 2.45 USD/kWh. A partir de este punto, el beneficio marginal asociado a una menor operación del generador ya no compensa el incremento en la inversión del almacenamiento, por lo que el costo vuelve a incrementarse para capacidades mayores. Cuando se incorpora la inflación del diésel, la estructura del compromiso se mantiene, pero el punto óptimo se desplaza hacia una mayor capacidad de almacenamiento. En este caso, la opción económicamente más conveniente corresponde a un banco de 153.6 kWh, con un costo mínimo de 2.85 USD/kWh. Este desplazamiento refleja que, bajo un escenario de mayores costos operativos futuros, resulta económicamente justificable invertir en un banco de baterías más grande para reducir de manera más agresiva la dependencia del generador auxiliar.

En consecuencia, aunque la inflación del diésel incrementa el costo unitario en todo el rango de capacidades analizadas, también modifica el balance óptimo entre inversión y operación, evidenciando que la capacidad económicamente óptima del banco de baterías depende del contexto económico considerado. Dado que la inflación del combustible es un fenómeno consistente y esperable a lo largo de la vida útil del sistema, el escenario que la incorpora representa una aproximación más realista a las condiciones de operación de la

microrred. Bajo esta perspectiva, la selección de un banco de baterías de 153.6 kWh se considera la opción más adecuada, ya que permite minimizar la exposición a incrementos futuros en el costo del diésel mediante una mayor sustitución del generador auxiliar, aun a costa de una inversión inicial ligeramente superior.

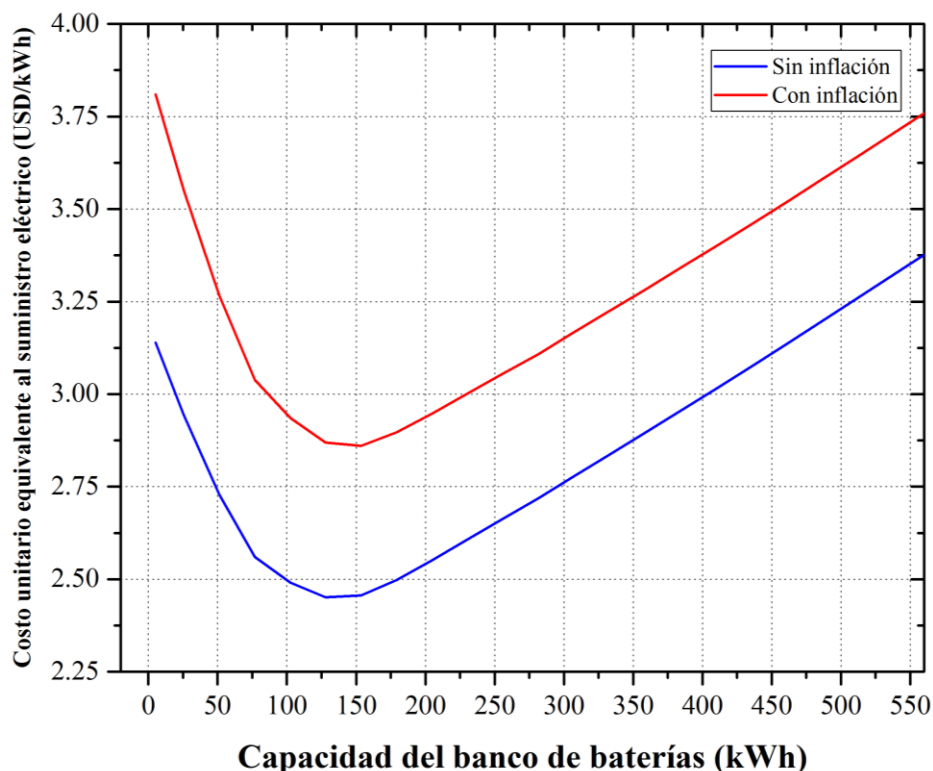


Figura 57. Costo unitario equivalente al suministro de la microrred en función de la capacidad del banco de baterías.

4.3.5 Propuesta del sistema agrovoltaico integral para el ejido Laguna Salada.

Con base en el dimensionamiento desarrollado en las secciones previas, se propone un sistema agrovoltaico integral para el Ejido Laguna Salada que articula, de manera coordinada, la generación fotovoltaica, el abastecimiento hídrico para riego y consumo humano, y el suministro eléctrico comunitario. La configuración seleccionada considera un arreglo agrovoltaico con módulos fotovoltaicos en orientación horizontal y una densidad agrovoltaica del 25% sobre el eje X, como solución de compromiso entre la captación energética y la disponibilidad de radiación para el componente agrícola. Bajo este esquema se incorpora, como cultivo de aplicación, la berenjena bajo el sistema agrovoltaico en un área estimada de 0.1584 ha, manteniendo como base las 1.58 ha de palma datilera

actualmente establecidas en los huertos familiares. Para asegurar continuidad en el suministro de agua ante la variabilidad de irradiancia y periodos de baja producción fotovoltaica, se determina una capacidad de almacenamiento hídrico de 182.4 m³, suficiente para respaldar tanto los requerimientos de riego como la demanda de consumo humano considerada. De manera complementaria, el dimensionamiento de la microrred se establece con un banco de baterías de 153.6 kWh, identificado como la alternativa más conveniente dentro del análisis realizado, al equilibrar el aprovechamiento del recurso solar y el costo asociado al respaldo con generador auxiliar. Estos elementos conforman la propuesta final del sistema para el ejido y sirven como base para sintetizar su desempeño mediante indicadores agrícolas, hídricos y energéticos, cuyos resultados se presentan en la Tabla 10.

Si bien la berenjena se emplea como caso de aplicación, la densidad agrovoltaica adoptada permite extender el análisis hacia un conjunto de alternativas agrícolas compatibles, con el propósito de aportar un catálogo que apoye la toma de decisiones del ejido y de futuros proyectos en contextos similares. Por ello, además de la berenjena, se incluyen en la Tabla 10 los indicadores correspondientes a maíz, trigo, tomate, calabacita y zanahoria, de modo que el lector disponga de una referencia comparativa para explorar combinaciones cultivo, energía y agua bajo la misma configuración agrovoltaica. Esta inclusión no busca fijar una elección única, sino ampliar el abanico de posibilidades y facilitar que la selección responda a prioridades locales, tales como valor económico, manejo agronómico, disponibilidad de insumos, calendario agrícola y preferencias de la comunidad, manteniendo como base el desempeño técnico del sistema propuesto.

En términos productivos, la berenjena presenta el mayor rendimiento por hectárea (39.47 ton/ha) y, en consecuencia, una producción potencial anual elevada (9.96 ton/año). En paralelo, es el cultivo con menor requerimiento hídrico por hectárea (4,189.14 m³/ha). Desde el componente energético, el modelo muestra que la energía específica de bombeo se mantiene prácticamente constante entre cultivos ($\approx 0.74\text{--}0.76$ kWh/m³), al estar dominada por la altura manométrica y la curva de operación de la bomba. Aunque en berenjena este valor aparece ligeramente mayor (0.76 kWh/m³), no compromete su desempeño anual, ya que su menor requerimiento de agua por hectárea se traduce en la menor energía anual por hectárea cultivada (22,724.68 kWh/ha). Asimismo, al normalizar por producto, la berenjena

se mantiene en el mismo orden de magnitud que los cultivos más competitivos (8,160.63 kWh/ton), lo que sugiere una relación energía, agua y producción favorable bajo la infraestructura propuesta.

Finalmente, el componente económico refuerza esta selección: la berenjena presenta el precio medio rural más alto (14,448.02 MXN/ton), aproximadamente el doble respecto a la mayoría de las alternativas comparadas. En términos prácticos, implica que, bajo la misma infraestructura de agua y energía, ofrece un mayor potencial de valor por unidad de área con un requerimiento hídrico relativamente bajo. De manera complementaria, los demás cultivos incluidos en la tabla pueden interpretarse como alternativas orientadas a distintos objetivos del ejido (ingreso, diversificación, robustez hídrica o disponibilidad estacional). Por ejemplo, el tomate muestra un rendimiento competitivo (38.89 ton/ha) y una producción potencial elevada, lo que puede ser atractivo cuando se prioriza el volumen de cosecha; la calabacita combina un requerimiento hídrico moderado (5,951.61 m³/ha) con un precio medio rural relativamente alto (8,381.77 MXN/ton), por lo que resulta interesante en estrategias de diversificación; la zanahoria presenta un desempeño intermedio relativamente equilibrado en rendimiento (29.89 ton/ha) y requerimiento hídrico (7,623.53 m³/ha); mientras que maíz y trigo pueden incorporarse como alternativas si el objetivo es explorar escenarios con cultivos de consumo básico.

En este marco, no existe un cultivo óptimo en términos absolutos, ya que cada alternativa ofrece ventajas específicas según el criterio que se priorice, ya sea técnico, económico o social. El valor central de la propuesta agrovoltaica, por tanto, no radica únicamente en maximizar un indicador, sino en habilitar un marco flexible de adopción. El esquema permitiría introducir cultivos hortícolas bajo sombra sin desplazar el aprovechamiento actual del dátil, integrando dos actividades complementarias dentro del mismo predio: la producción fotovoltaica y la producción hortícola bajo condiciones de radiación modificada, mientras que las zonas descubiertas mantienen prácticas convencionales. Así, la mejor alternativa depende de las metas y restricciones locales, y un sistema agrovoltaico exitoso no surge de una fórmula universal, sino de su capacidad para adaptarse a condiciones reales de operación, al mismo tiempo que asegura viabilidad económica y apropiación social. Reconocer esta flexibilidad es clave para orientar el diseño hacia

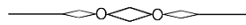
soluciones implementables, donde el desempeño técnico se traduzca en beneficios tangibles para la comunidad y en una adopción sostenible en el tiempo.

Tabla 10. Indicadores del sistema agrovoltaico integral cultivando dátíl con distintos cultivos complementarios.

Indicador	Sistema agrovoltaico integral cultivando dátíl con...					
	Maíz	Trigo	Tomate	Calabacita	Zanahoria	Berenjena
Rendimiento agrícola por hectárea bajo sistema agrovoltaico (ton/ha) [114].	4.28	6.20	38.89	21.15	29.89	39.47
Producción agrícola potencial (ton/año).	4.39	4.69	9.87	7.06	8.44	9.96
Requerimiento hídrico por hectárea (m ³ /ha).	10,760.60	7,983.39	9,517.66	5,951.61	7,623.53	4,189.14
Requerimiento hídrico por tonelada de producto (m ³ /ton).	13,595.90	12,160.32	10,939.64	10,982.56	10,951.72	10,777.42
Energía eléctrica utilizada por metro cubico de agua bombeada (kWh/m ³).	0.74	0.75	0.74	0.75	0.75	0.76
Energía eléctrica anual por hectárea cultivada (kWh/ha).	27,776.4	25,678.39	26,847.99	24,111.43	25,398.60	22,724.68
Energía eléctrica por tonelada de producto cosechado (kWh/ton).	10,035.8	9,082.74	8,119.07	8,274.88	8,191.24	8,160.63
Precio medio rural del cultivo bajo sistema agrovoltaico (MXN/ton) [114].	6,479.3	6,948.10	6,913.26	8,381.77	7,160.94	14,448.02

Capítulo V

HUERTO AGROVOLTAICO EXPERIMENTAL



*“La tecnología solo tiene sentido cuando
sirve a las generaciones futuras”.*

- Lewis Mumford.

5.1 Introducción y objetivos del huerto agrovoltaico.

5.1.1 Contexto y justificación: primer esfuerzo agrovoltaico en la región.

Este capítulo presenta el diseño, construcción y puesta en marcha del primer huerto agrovoltaico experimental en la región, concebido como una plataforma piloto para trasladar los hallazgos de modelado computacional a un entorno físico tangible. A diferencia de los sistemas fotovoltaicos tradicionales, este huerto incorpora una configuración innovadora del módulo fotovoltaico: en disposición horizontal, decisión fundamentada en los resultados del estudio de sombras desarrollado previamente en esta tesis.

Más allá de su función experimental, el huerto se ha consolidado como un prototipo replicable y educativo, sentando las bases para la transferencia de conocimiento en instituciones de enseñanza y fomentando la adopción de tecnologías sostenibles en el sector agrícola local. Hasta la fecha, no existían en la región experiencias documentadas de sistemas agrovoltaicos instrumentados y diseñados con base en estudios previos de distribución de sombras y microclima. Este huerto experimental constituye, por tanto, el primer esfuerzo local por materializar un sistema agrovoltaico diseñado desde la investigación aplicada, con el fin de evaluar no solo su desempeño energético, sino también su impacto en las condiciones edafoclimáticas y el desarrollo de los cultivos.

5.1.2 Objetivos.

El huerto agrovoltaico experimental fue concebido con los siguientes objetivos:

1. Evaluar el efecto del sombreado parcial en el microclima y la humedad del suelo, mediante la comparación sistemática entre una parcela cubierta por el sistema agrovoltaico y una parcela testigo expuesta completamente al sol.
2. Establecer una plataforma experimental permanente que permita, en futuras etapas, probar diferentes configuraciones estructurales, tipos de cultivo y estrategias de manejo agronómico.

3. Generar un prototipo replicable y escalable que pueda ser adaptado a otros contextos educativos, productivos o demostrativos, facilitando la transferencia tecnológica y la divulgación de la agrovoltaica.

5.2 Diseño estructural.

5.2.1 Descripción general del huerto agrovoltaico.

El diseño del huerto agrovoltaico experimental se derivó directamente de los hallazgos del modelo de sombras desarrollado previamente, priorizando una configuración horizontal del módulo fotovoltaico sobre las verticales tradicionales. Esta decisión se fundamenta en la búsqueda de un sombreado uniforme y extendido, que mitiga el estrés térmico e hídrico del cultivo bajo las condiciones de alta radiación solar de la región.

El sistema agrovoltaico se compone de una estructura de madera ajustable que permite modificar la altura y la inclinación del módulo fotovoltaico para simular distintas configuraciones de sistemas a escala real. La estructura está construida con barrotes de madera de 4x2” y tablas de madera de 1x12” que proporcionan facilidad de ensamblaje. El conjunto permite variar la altura libre del módulo entre 1.5 m y 2.0 m, y adoptar inclinaciones regulables de 0° a 30°, con fijación mediante pernos que garantizan estabilidad estructural durante los ensayos.

El módulo fotovoltaico utilizado corresponde a un módulo bifacial de 630 W (véase Anexo E) orientado hacia el sur geográfico. La estructura fue diseñada de modo que el módulo pueda moverse manualmente a diferentes posiciones, lo cual permite evaluar cómo las variaciones de altura e inclinación modifican la distribución de sombras y la irradiancia incidente sobre el suelo.

El conjunto completo se muestra en la Figura 58, donde se aprecian los principales componentes estructurales y la disposición de la microparcela.

Las ventajas clave de este diseño integrado son:

- Protección microclimática: La horizontalidad genera un patrón de sombra estable que reduce los picos de temperatura y la evapotranspiración.

- Flexibilidad experimental: Los ajustes de altura e inclinación permiten estudiar la relación entre configuración estructural, distribución de luz y respuesta del cultivo.
- Replicabilidad educativa: La simplicidad constructiva y la adaptabilidad lo convierten en una herramienta ideal para transferencia tecnológica en entornos académicos.



Figura 58. Vista isométrica del huerto agrovoltaico experimental.

5.3 Construcción y puesta en marcha.

Para la construcción del huerto agrovoltaico; se seleccionó un terreno nivelado y firme, libre de obstáculos y con exposición solar directa. Siguiendo las especificaciones del plano, se perforaron cuatro orificios de 50 cm de profundidad en los vértices de la futura microparcela (1.15×2.38 m). En cada uno se introdujo un barrote base de madera, asegurando su verticalidad con un nivel, y se fijó con tierra compactada (Figura 59).



Figura 59. Preparación del terreno. a) proceso de perforación del plano; b) instalación de los barrotes base de madera.

Posteriormente, se instalaron los barrotes extendibles internos y el barrote transversal, que permiten ajustar la altura e inclinación del módulo, fijándolos con tornillos hexagonales, tuercas y arandelas. Se verificó que todos los elementos quedaran alineados y paralelos (Figura 60).

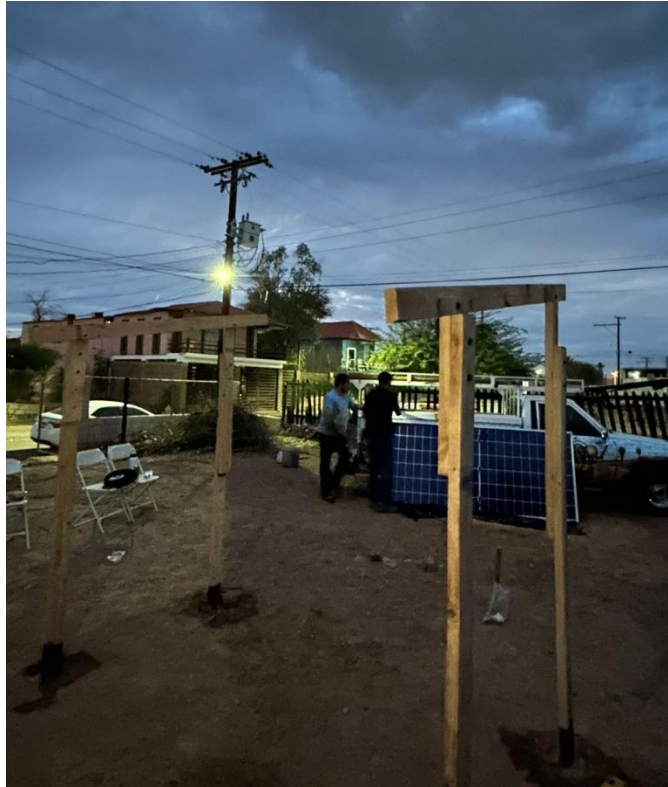


Figura 60. Estructura del huerto agrovoltaico que sostiene y ajusta la posición del módulo fotovoltaico.

Sobre los barrotes base se ensambló el marco rectangular de la microparcela utilizando tablas de madera, unidas con tornillos autorroscables. La microparcela testigo fue construida con tablas de madera a lado del huerto agrovoltaico. El módulo fotovoltaico bifacial de 630 W se colocó sobre los ángulos perimetrales de la estructura y se aseguró con abrazaderas y tornillos autoperforantes, garantizando su centrado y firmeza (Figura 61).



Figura 61. a) huerto agrovoltaico instalado; b) uniones de la estructura.

5.4 Instrumentación y sensores instalados.

La adquisición de datos en el huerto agrovoltaico se llevó a cabo mediante sensores inalámbricos Whisperer-2 de la marca Netro, los cuales permiten medir de forma continua diversos parámetros microclimáticos y de humedad del suelo en ambas microparcels: la agrovoltaica y la testigo. Estos dispositivos integran sensores internos de humedad del suelo, temperatura del suelo y luminosidad incidente, además de registrar indirectamente las variaciones de radiación solar mediante su sensor óptico de luz visible. Asimismo, a través de la conexión a internet, los equipos complementan la información con datos meteorológicos externos, como la temperatura ambiente y la precipitación.

Cada sensor transmite los datos de manera inalámbrica hacia una base de datos en la nube del sistema Netro, lo que permite la consulta remota y el almacenamiento automático de la información. El intervalo de registro configurado fue de una hora, valor que puede ajustarse desde la plataforma del fabricante. Para verificar el funcionamiento de los sensores y caracterizar la dinámica temporal de las variables medidas, se realizó una corrida de prueba colocando dos unidades en condiciones controladas y comparables (macetas contiguas y bajo el mismo entorno), manteniéndolas registrando datos durante varios días.

La Figura 62 presenta un ejemplo representativo de esta prueba, donde se observan series horarias para dos sensores (S1 y S2) midiendo simultáneamente humedad del suelo, luminosidad y temperatura superficial del suelo. La señal de luminosidad muestra picos marcados durante las horas diurnas y valores cercanos a cero durante la noche, lo cual es consistente con el ciclo solar; en paralelo, la temperatura del suelo exhibe un comportamiento cíclico asociado al calentamiento y enfriamiento diario. La humedad del suelo, en cambio, presenta variaciones más graduales, coherentes con la mayor inercia hídrica del sustrato y con cambios ligados a eventos de riego y/o evaporación. En conjunto, la similitud en tendencias entre S1 y S2 bajo condiciones equivalentes respalda la consistencia del sistema de medición y su idoneidad para el monitoreo comparativo posterior entre la microparcela agrovoltaica y la testigo, donde se espera que el sombreado modifique principalmente la radiación incidente y, en consecuencia, las dinámicas térmicas e hídricas del suelo.

Finalmente, se instalaron dos sensores Whisperer-2: uno en la microparcela agrovoltaica y otro en la microparcela testigo, con el propósito de comparar las variaciones de humedad y temperatura en función del sombreado generado por los módulos fotovoltaicos.

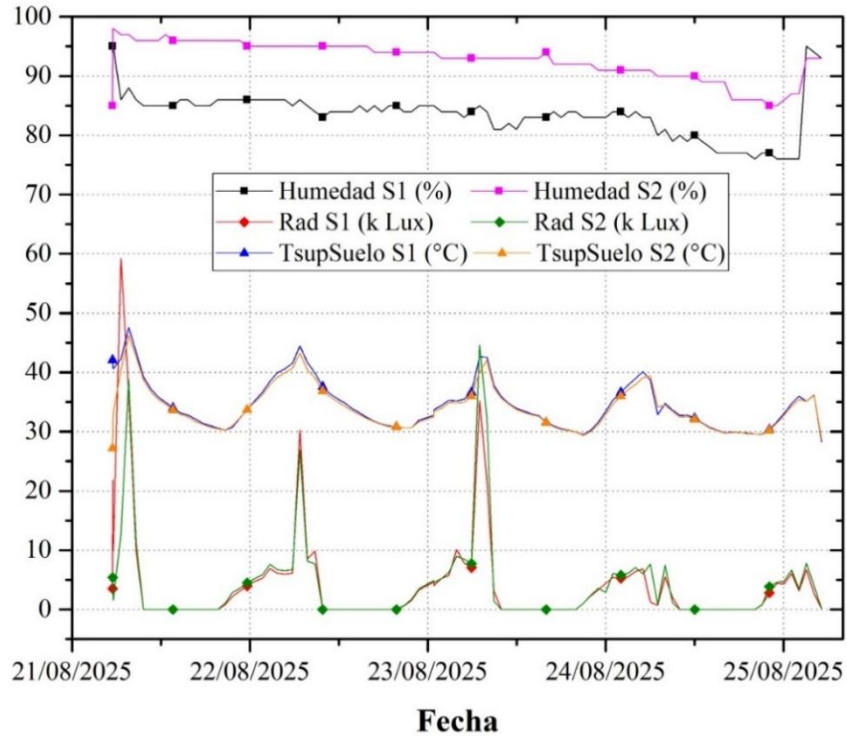


Figura 62. Prueba y verificación de lectura de sensores Whisperer-2.

5.5 Primera etapa agronómica.

Con el fin de establecer una línea base agronómica para el piloto de huerto agrovoltaico, se implementó una primera etapa de cultivo utilizando pepino (*Cucumis sativus*) como especie modelo. Esta etapa tuvo un carácter demostrativo y de aprendizaje operativo: permitió poner a prueba el flujo completo de trabajo (preparación de sustrato, germinación, manejo de plántulas, trasplante y conducción), además de habilitar el registro inicial de variables agronómicas y su posterior vinculación con el monitoreo microclimático del sitio. El pepino se eligió por su rápido establecimiento, respuesta sensible a la radiación/temperatura y facilidad para documentar cambios fenológicos tempranos, lo cual lo hace adecuado para una primera corrida del sistema bajo condiciones locales.

5.5.1 Germinación y trasplante.

Siembra y germinación: La germinación se realizó en contenedores individuales (macetas) con sustrato comercial, buscando homogeneidad inicial y facilidad de manejo. Durante los primeros días se documentó la emergencia de plántulas, identificándose el

estadio de cotiledones y la transición hacia hojas verdaderas (Figura 63). En esta fase se observó variación en la elongación del tallo en algunas plántulas, consistente con condiciones de iluminación no uniforme o competencia por luz en el espacio de resguardo; por ello, el manejo posterior priorizó la exposición gradual a mayor radiación (endurecimiento) y el uso de tutores para evitar acame.



Figura 63. Proceso de siembra y germinación. a) emergencia de plántulas; b) aparición de cotiledones; c) emergencia de hoja verdadera.

Manejo de plántulas: Conforme avanzó el crecimiento vegetativo, se registró el desarrollo de hojas verdaderas, el engrosamiento del tallo y la emisión de guías. Para mantener la arquitectura de la planta y reducir daño mecánico durante el traslado, se incorporaron tutores simples (varillas) y amarres, asegurando la orientación vertical inicial de la guía principal y evitando torsiones (Figura 64).

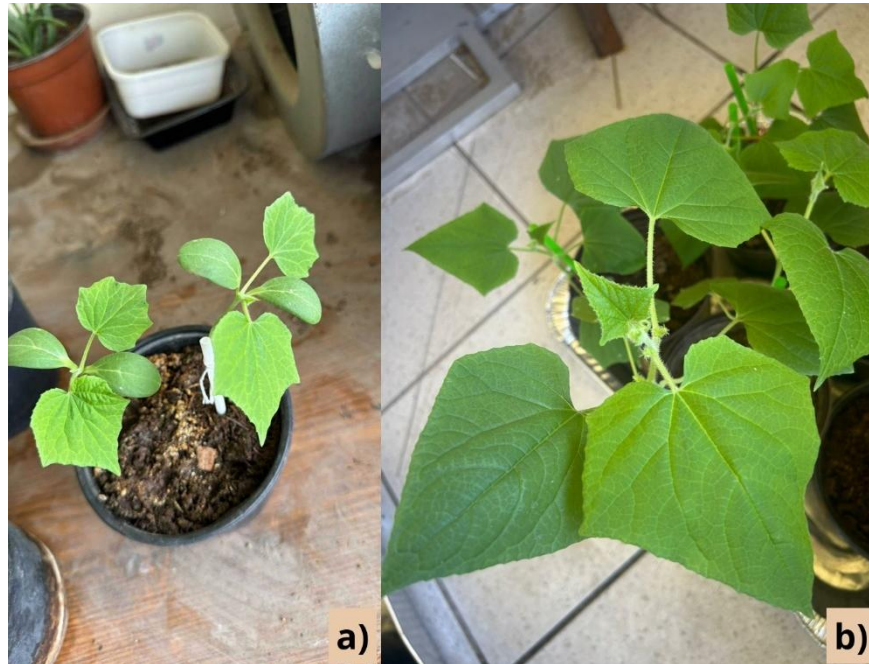


Figura 64. *a) incorporación de tutores; b) aparición de la floración.*

Trasplante al huerto agrovoltaico: El trasplante se realizó desde maceta hacia las microparcels, acondicionada con sustrato y ubicada en la zona de huerto bajo la estructura agrovoltaica. La cama se complementó con una malla tipo espaldera como elemento de conducción, anticipando el crecimiento trepador del pepino y facilitando el ordenamiento espacial del follaje (Figura 65). Tras el trasplante se aplicó riego de establecimiento y se verificó la estabilidad mecánica (contacto raíz–sustrato, compactación ligera y ausencia de bolsas de aire), así como la integridad de tallos y hojas.



Figura 65. Trasplante al huerto agrovoltaico.

5.6 Réplica educativa y transferencia de conocimiento.

El huerto agrovoltaico experimental trascendió su función original como plataforma de investigación para convertirse en un modelo replicable de transferencia tecnológica y educativa. Este proceso de réplica se materializó a través de una colaboración estratégica con el Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario #328 (CBTA #328), institución con la que se estableció una alianza orientada a la innovación educativa, la sostenibilidad y la formación técnica contextualizada.

5.6.1 Alianza con CBTA #328: contextualización y motivación.

La vinculación con el CBTA #328 surgió como una iniciativa para acercar la tecnología agrovoltaica a un entorno formativo de nivel medio superior, donde la agricultura y las energías renovables forman parte esencial del currículum. La motivación principal fue demostrar que la agrovoltaica no es solo un concepto teórico o de gran escala, sino una tecnología accesible, modular y adaptable que puede integrarse en espacios educativos con fines demostrativos, experimentales y productivos.

Esta alianza buscó:

- Acercar a los estudiantes a tecnologías sostenibles aplicadas al ámbito agropecuario.
- Generar un espacio vivo de experimentación que complemente la enseñanza teórica.
- Fomentar la replicabilidad del modelo en otras instituciones educativas.
- Establecer un vínculo entre la investigación universitaria y la educación tecnológica agropecuaria.

5.6.2 Instalación de la segunda versión del huerto en el plantel educativo.

Durante el último trimestre de 2025, se realizó la instalación de una segunda versión del huerto agrovoltaico en las instalaciones del CBTA #328 (Figura 66 y Figura 67). Este proceso incluyó la adaptación del diseño original para su integración en el espacio disponible, manteniendo los principios de simplicidad constructiva, uso de materiales locales y capacidad de ajuste en altura e inclinación.

La instalación fue realizada en colaboración con estudiantes del plantel, quienes participaron activamente en el ensamblaje, lo que permitió no solo una transferencia técnica, sino también un aprendizaje práctico sobre montaje estructural, seguridad en instalaciones fotovoltaicas y principios de diseño agrovoltaico.



Figura 66. Proceso de instalación junto a estudiantes de CBTA #328.



Figura 67. Huerto agrovoltaico en las instalaciones de CBTA #328.

5.6.3 Entrega de documentación: guía de instalación, manual de usuario y actividades didácticas.

Para asegurar la autonomía en el uso y mantenimiento del sistema, se desarrolló y entregó al CBTA #328 un paquete completo de documentación que incluye una guía de instalación, un manual de usuario y una propuesta de actividades didácticas (Figura 68), compuesto por:

- Guía de instalación paso a paso, ilustrada con planos, diagramas y listas de materiales, basada en la experiencia de construcción del prototipo original.
- Manual de usuario operativo, con instrucciones para el ajuste estructural, monitoreo de sensores, manejo del riego y mantenimiento preventivo
- Propuesta de actividades didácticas, diseñadas para integrar el huerto en distintas asignaturas (Agronomía, Energías Renovables, Biología), con ejercicios que van desde la medición de variables microclimáticas hasta el análisis de la interacción luz-planta.

Esta documentación no solo facilita la operación del sistema, sino que también ofrece a los docentes una herramienta pedagógica estructurada para enriquecer la experiencia educativa.

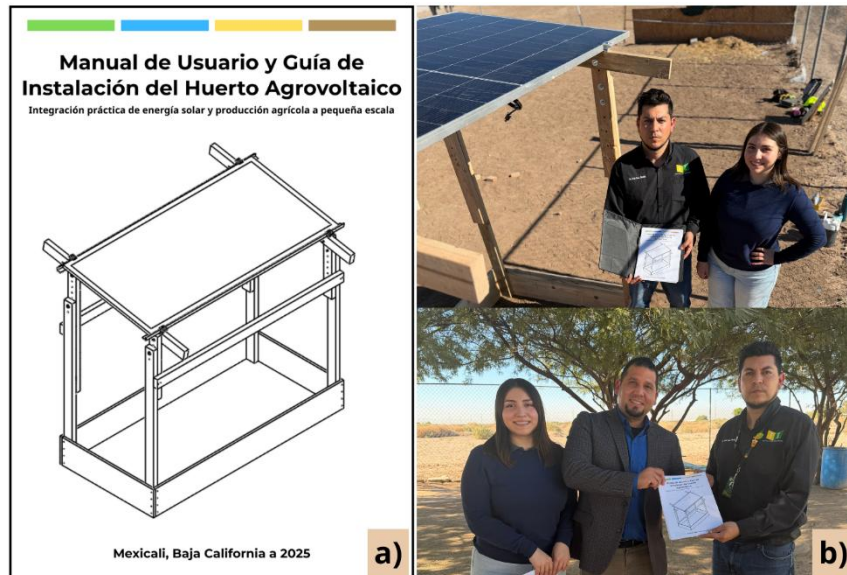


Figura 68. Entrega de documentación. a) Portada del manual de usuario y guía de instalación del huerto agrovoltaico; b) entrega de documentación al director del plantel CBTA #328.

5.6.4 Impacto educativo.

La instalación del huerto agrovoltaico en el CBTA #328 ha sentado las bases para un aprendizaje experiencial significativo, alineado con los objetivos de la educación tecnológica agropecuaria. Entre los impactos educativos identificados destacan:

- Integración curricular transversal: El sistema se utiliza como recurso didáctico en múltiples módulos, permitiendo a los estudiantes analizar fenómenos físicos (radiación, sombreado), procesos biológicos (fotosíntesis, desarrollo vegetal) y técnicas agronómicas (manejo de riego, sustratos) en un mismo espacio integrado.
- Fomento de competencias técnicas y científicas: Los estudiantes participan en la toma de datos, interpretación de gráficas, ajuste de variables experimentales y propuesta de mejoras, desarrollando habilidades en monitoreo ambiental, análisis de datos y pensamiento sistémico.
- Conciencia sobre sostenibilidad y energía limpia: El huerto sirve como ejemplo tangible de cómo la agricultura y la generación de energía pueden coexistir de manera sinérgica, promoviendo una visión integral de la sostenibilidad en entornos rurales y educativos.

- Réplica escalable: Este primer caso de transferencia constituye un modelo replicable que puede adaptarse a otros planteles de educación media superior, técnica o superior, ampliando así el alcance social y educativo de la propuesta agrovoltaica desarrollada en esta tesis.

Capítulo VI

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS



*“La mejor forma de predecir el futuro es
creándolo.”*

- Peter Drucker.

6.1 Conclusiones.

A partir del trabajo realizado, se concluye que la implementación de un sistema agrovoltaico integral en la región desértica de Baja California es técnicamente viable y pertinente cuando se diseña bajo criterios locales y desde una perspectiva de nexo agua–energía–alimento. En este trabajo, se caracterizó el caso de estudio del Ejido Laguna Salada considerando sus condiciones climáticas, geográficas y de infraestructura hídrico-energética, y con base en ello se formuló una propuesta de sistema agrovoltaico integral definida por su configuración física y su lógica de operación acoplada. Posteriormente, se desarrolló un modelo matemático orientado a reproducir el desempeño operativo del sistema bajo condiciones locales, incorporando geometría solar y datos climatológicos, estimación de irradiancia y potencia fotovoltaica, un modelo de sombras para representar la distribución espacial de radiación a nivel de suelo, el cálculo de evapotranspiración y requerimientos de riego, el desempeño del bombeo a partir de curvas técnicas interpoladas, el almacenamiento hídrico y la irrigación, así como la gestión energética de una microrred con baterías, conversión por inversor y respaldo diésel. Finalmente, el modelo se utilizó como herramienta de simulación y análisis para aplicar un método integral de dimensionamiento orientado a comunidades aisladas, complementado con evidencia experimental a escala piloto y parámetros de literatura y fichas técnicas.

Bajo este enfoque, el sistema se evaluó como un conjunto acoplado y no como subsistemas independientes, cuyo desempeño depende de compromisos cuantificables entre disponibilidad solar, demanda energética, requerimientos de riego y condiciones microclimáticas representadas mediante evapotranspiración. En consecuencia, el problema deja de abordarse como un ejercicio de maximización energética y se replantea como uno de continuidad operativa y resiliencia, donde el objetivo central es asegurar el suministro hídrico y eléctrico con estabilidad anual ante la variabilidad de irradiancia.

En términos de capacidad energética e hidráulica, el análisis estacional muestra que el sistema fotovoltaico puede alcanzar potencias máximas del orden de 60 kW al mediodía solar en el solsticio de verano, aproximadamente 52 kW en el equinoccio de otoño, y alrededor de 34 kW en el solsticio de invierno. Esta variación se refleja directamente en el

potencial de bombeo: bajo condiciones de verano, el sistema es capaz de bombear hasta 1,342 m³, mientras que en el equinoccio se estiman hasta 1,065 m³, y en invierno el bombeo desciende a aproximadamente 377.97 m³. En conjunto, estos resultados confirman la sensibilidad del desempeño a la estacionalidad solar y, al mismo tiempo, permiten cuantificar el margen operativo disponible para sostener el suministro de agua bajo diferentes periodos del año.

Como resultado de este proceso, se consolida una configuración agrovoltaica específica para el Ejido Laguna Salada: módulos fotovoltaicos en orientación horizontal y una densidad agrovoltaica del 25% sobre el eje X (Este–Oeste), como un compromiso adecuado entre captación energética y distribución homogénea de sombra. Esta elección responde no solo a criterios geométricos y energéticos, sino también a su compatibilidad agronómica, ya que el nivel de radiación disponible bajo dicha densidad permite cubrir, a lo largo de sus temporadas de cultivo, los rangos de requerimiento de radiación asociados a la mayor parte de las alternativas evaluadas. En particular, esta configuración resulta consistente con un portafolio amplio de cultivos como berenjena, tomate, trigo, calabacita, maíz y zanahoria, al ofrecer un régimen de sombreado que mantiene la disponibilidad luminosa dentro de umbrales operativos para su desarrollo, facilitando la flexibilidad productiva del sistema sin modificar la base del diseño.

Esta definición no se limita a adoptar valores reportados en la literatura, sino que traduce las condiciones del sitio en parámetros de diseño, habilitando criterios propios para dimensionar la relación entre sombra, espacio agrícola y producción energética bajo condiciones desérticas, y marcando un primer paso hacia el diseño agrovoltaico con base local en la región. Adicionalmente, el arreglo agrovoltaico evaluado introduce un beneficio hídrico diferenciado según el cultivo: la lámina bruta de riego se reduce respecto a cielo abierto en tomate ($\approx 22.29\%$), calabacita ($\approx 21.34\%$), trigo ($\approx 19.52\%$), zanahoria ($\approx 19.11\%$) y berenjena ($\approx 16.20\%$), mientras que maíz presenta una disminución más moderada ($\approx 5.03\%$). En conjunto, estos resultados se traducen en un ahorro promedio cercano al 17.25% en el conjunto de cultivos analizados. En términos prácticos, esta reducción de la lámina bruta implica un menor volumen anual requerido por unidad de superficie cultivada,

fortaleciendo la viabilidad del sistema en un contexto donde el bombeo representa el principal cuello de botella y el recurso hídrico constituye el factor limitante.

En términos de almacenamiento hídrico, el análisis demuestra que la robustez del sistema está fuertemente condicionada por la capacidad de almacenamiento. Para la demanda agrícola y de consumo humano considerada, un tanque de 182.4 m³ resulta suficiente para eliminar el déficit anual bajo variabilidad solar, transformando una operación vulnerable, dependiente de la irradiancia diaria, en una operación anual continua. Este respaldo permite desacoplar parcialmente el riego de la producción fotovoltaica instantánea, condición clave para la viabilidad del sistema en comunidades rurales aisladas donde los eventos de baja irradiancia y la intermitencia intradía comprometen el suministro.

En paralelo, el análisis de almacenamiento eléctrico indica que capacidades pequeñas prolongan la dependencia del respaldo (diésel), mientras que el sobredimensionamiento incrementa el costo sin beneficios proporcionales. Esta evaluación se realizó a partir de un perfil horario anual de demanda eléctrica, construido para 20 viviendas, el cual representa la variación temporal del consumo a lo largo del año y constituye la entrada principal para estimar el desempeño del suministro bajo distintas configuraciones; con base en dicho perfil, la energía anual demandada asciende a 91,810.41 kWh. A partir de la exploración económica realizada con una proyección a 10 años y considerando las dinámicas diarias de operación del sistema, se identifica que la capacidad óptima del banco de baterías depende del escenario de costos asumido. No obstante, dado que la inflación del combustible de respaldo es un fenómeno esperable a lo largo de la vida útil de la microrred, el escenario que la incorpora se adopta como referencia para la toma de decisión final. Bajo este criterio, un banco de baterías de 153.6 kWh se selecciona como la configuración más adecuada, al permitir una reducción sustancial de la aportación del generador auxiliar, mejorar la continuidad del suministro y mantener un compromiso razonable entre inversión inicial y desempeño operativo.

En términos económicos, esta configuración presenta un costo unitario equivalente del suministro eléctrico de 2.85 USD/kWh al considerar la inflación del diésel, lo que pone de manifiesto la sensibilidad del desempeño económico de la microrred ante el costo del

combustible de respaldo y refuerza la importancia de minimizar su participación mediante un dimensionamiento adecuado del almacenamiento eléctrico. En conjunto, los resultados subrayan que la integración estratégica de baterías constituye un elemento clave para aumentar la fracción solar del sistema, que alcanza valores del 61%, y para avanzar hacia esquemas de suministro más robustos y menos dependientes de combustibles fósiles.

En conjunto, el valor central de la propuesta no radica en imponer una elección agrícola única, sino en habilitar un marco flexible de adopción sustentado en una misma infraestructura acoplada de energía y agua. Aunque la berenjena se emplea como caso de aplicación para el dimensionamiento, su selección se justifica por su alto potencial de valor, al presentar el precio medio rural más elevado entre las alternativas consideradas (14,448.02 MXN/ton), lo que sugiere que, bajo una misma plataforma de bombeo, almacenamiento y gestión energética, puede maximizar el ingreso potencial manteniendo un requerimiento hídrico relativamente manejable. No obstante, la comparación con cultivos alternativos confirma que la configuración evaluada permite orientar el sistema hacia distintas prioridades locales sin modificar la base del diseño: el tomate ofrece una ruta enfocada en volumen de producción, con un rendimiento competitivo de 38.89 ton/ha; la calabacita resulta atractiva para estrategias de diversificación al combinar un requerimiento hídrico moderado de 5,951.61 m³/ha con un precio medio rural relativamente alto de 8,381.77 MXN/ton; la zanahoria representa un desempeño equilibrado en términos de rendimiento (29.89 ton/ha) y demanda de riego (7,623.53 m³/ha); mientras que maíz y trigo pueden incorporarse como escenarios de cultivos básicos, relevantes cuando el objetivo es fortalecer opciones de consumo y pertinencia comunitaria. De esta forma, el sistema propuesto no se limita a un cultivo específico, sino que funciona como una plataforma de decisión para que la selección final responda a criterios del ejido como ingreso, robustez hídrica, calendario agrícola, disponibilidad de insumos y preferencias locales, conservando la coherencia del enfoque agua–energía–alimento.

Además de los resultados de dimensionamiento y desempeño, el huerto agrovoltaico experimental constituye uno de los aportes aplicados centrales de este trabajo, al funcionar como un primer avance de implementación que permite materializar el concepto agrovoltaico y facilitar la transferencia del conocimiento hacia actores locales. Este huerto

se establece como una plataforma demostrativa e instrumentada para el seguimiento de variables microclimáticas y del suelo en una microparcela agrovoltaica y una testigo, habilitando un esquema de monitoreo continuo y comparable que sienta las bases para etapas posteriores de validación, ajuste y aprendizaje operativo. Asimismo, su alcance trasciende el ámbito académico al concretarse una réplica educativa en colaboración con el CBTA #328, donde se instaló una segunda versión con participación activa de estudiantes, fortaleciendo la apropiación técnica y la formación práctica en montaje y principios agrovoltaicos. En paralelo, la permeación del trabajo se formaliza mediante la entrega de un paquete completo de documentación (guía de instalación, manual de usuario y actividades didácticas), orientado a asegurar autonomía de operación, facilitar la replicabilidad y promover su integración como herramienta pedagógica transversal en asignaturas agropecuarias y de energías renovables.

Con ello, la agrovoltaica deja de ser una idea importada y se convierte en una alternativa diseñada desde el territorio: con densidades definidas para el sitio, con sombra utilizable como variable de proyecto, y con dimensionamientos que aseguran continuidad hídrica y eléctrica para sostener simultáneamente energía, agua y alimento. En un entorno donde la radiación abunda, el aporte decisivo es convertir esa abundancia solar en estabilidad operativa y en opciones productivas reales, medibles y comparables para la comunidad.

6.2 Trabajos futuros.

El presente trabajo abre una línea de investigación con amplio potencial de desarrollo en el ámbito de los sistemas agrovoltaicos aplicados a zonas áridas y comunidades rurales aisladas. A continuación, se proponen diversas líneas de trabajo que podrían fortalecer, complementar y ampliar los resultados alcanzados en esta tesis.

1. Validación a largo plazo del sistema agrovoltaico en campo.

Es necesario implementar el sistema agrovoltaico integral en una parcela piloto del Ejido Laguna Salada, con monitoreo continuo de la generación eléctrica, caudal de bombeo, humedad del suelo, temperatura ambiente y rendimiento de los cultivos. El análisis de estos parámetros a lo largo de un ciclo agrícola completo permitirá validar experimentalmente el

modelo matemático bajo condiciones reales y ajustar las variables asociadas al comportamiento del microclima y a la eficiencia del sistema.

2. Análisis económico, energético y ambiental integral.

Se sugiere la incorporación de un análisis económico completo que contemple los costos de inversión, mantenimiento, reemplazo y operación del sistema. De igual forma, un estudio de retorno de inversión (ROI) y de relación beneficio-costos (B/C) permitiría dimensionar su viabilidad económica frente a sistemas convencionales.

Paralelamente, la aplicación de metodologías de análisis de ciclo de vida (LCA) permitiría evaluar la huella ambiental del sistema, cuantificando los beneficios en términos de reducción de emisiones y ahorro energético.

3. Escalamiento y modelado regional.

A futuro, sería valioso aplicar el método de dimensionamiento a otras localidades de la región desértica de Baja California, considerando distintos tipos de suelo, disponibilidad hídrica y patrones de cultivo. Esto permitiría construir un modelo regional agrovoltaico, generando información que apoye políticas públicas orientadas a la sustentabilidad hídrica, energética y alimentaria en zonas áridas.

4. Monitoreo climático y modelado avanzado del microclima.

Se recomienda profundizar en el estudio del microclima generado bajo los paneles fotovoltaicos mediante la instalación de estaciones meteorológicas con sensores de temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación fotosintéticamente activa (PAR). El desarrollo de modelos numéricos que relacionen estas variables con la productividad agrícola permitiría optimizar la geometría para cada tipo de cultivo.

Asimismo, el modelo matemático actual podría complementarse con nuevos submodelos de microclima, incorporando parámetros como temperatura del aire y del suelo, humedad relativa, velocidad del viento y radiación PAR, para generar una representación más completa de las interacciones entre el ambiente y el sistema fotovoltaico. De esta manera, el modelo dejaría de depender exclusivamente del cálculo de la evapotranspiración,

integrando un enfoque termodinámico y atmosférico que enriquecería su precisión y aplicabilidad.

5. Desarrollo de lineamientos y manuales técnicos de implementación

Se recomienda elaborar guías técnicas y propuestas de lineamientos para la implementación de sistemas agrovoltaicos en zonas áridas de México. Estas podrían incluir criterios básicos de diseño, selección de componentes y consideraciones de operación adaptadas a comunidades rurales.

Además, los resultados obtenidos podrían servir de referencia para programas institucionales o políticas públicas que impulsen la adopción de tecnologías agrovoltaicas en el sector agrícola nacional.

6. Análisis térmico del arreglo fotovoltaico.

Se propone complementar el modelo matemático con un análisis térmico centrado en la temperatura de los módulos fotovoltaicos, considerando cómo el microclima generado por el propio sistema influye en la disipación o acumulación de calor. Esto contribuiría a optimizar la geometría y ventilación del arreglo para mejorar su rendimiento energético global.

7. Monitoreo prolongado del huerto agrovoltaico experimental.

Se propone extender las mediciones del sistema durante al menos un ciclo agrícola completo, con el fin de analizar variaciones estacionales y establecer correlaciones entre la irradiancia, la temperatura, la humedad del suelo y el desarrollo de los cultivos. Estos datos permitirán fortalecer la validación de los modelos térmicos y microclimáticos propuestos en esta tesis.

8. Evaluación agronómica y fisiológica de cultivos bajo condiciones agrovoltaicas.

En futuras etapas se plantea incluir el seguimiento de variables agronómicas como tasa de crecimiento, biomasa, rendimiento y consumo hídrico de los cultivos, comparando los resultados entre la parcela agrovoltaica y la testigo. Esto permitirá cuantificar los efectos productivos reales del sombreado parcial.

9. Dimensionamiento del tanque con apoyo del auxiliar para el bombeo.

Se propone extender el dimensionamiento del almacenamiento hídrico considerando un respaldo de bombeo diésel, activado por umbrales de volumen en el tanque o por déficit de potencia fotovoltaica durante periodos críticos. Esto permitiría reducir la capacidad del tanque (y su costo de inversión) a cambio de una mayor participación del diésel, por lo que resulta pertinente evaluar el compromiso entre costo de almacenamiento y costo operativo del respaldo, identificando configuraciones de menor costo.

Bibliografía

- [1] F. H. Andrade, *Los desafíos de la agricultura*, 1st ed. .
- [2] SEMARNAT, “Huella ecológica, datos y rostros,” 2012. Accessed: Nov. 03, 2021. [Online]. Available: http://www.sema.gob.mx/descargas/manuales/HuellaEcologica_SEMARNAT.pdf.
- [3] G. D.G., “Energía y cambio climático,” *Derecho Ambient. y Ecol.*, vol. 10(55), pp. 61–63, 2013.
- [4] U. Nations, “Population | United Nations.” United Nations, Accessed: Mar. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/en/global-issues/population>.
- [5] FAO, *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo*. 2011.
- [6] N. M. Syano, M. M. Nyangito, G. Kironchi, and O. V. Wasonga, “Agroforestry practices impacts on soil properties in the drylands of Eastern Kenya ,” *Trees, For. People*, vol. 14, pp. 2666–7193, 2023, doi: 10.1016/j.tfp.2023.100437.
- [7] J. L. Monteith, C. K. Ong, and J. E. Corlett, “Microclimatic interactions in agroforestry systems☆,” *For. Ecol. Manage.*, 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90204-9](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90204-9).
- [8] J. E. Lott, C. K. Ong, and C. R. Black, “Understorey microclimate and crop performance in a *Grevillea robusta*-based agroforestry system in semi-arid Kenya,” doi: 10.1016/j.agrformet.2009.02.002.
- [9] J. L. Monteith and C. J. Moss, “Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain,” *Philos. Trans. R. Soc.*, 1977, doi: 10.1098/rstb.1977.0140.
- [10] A. ZASTROW, A. GOETZBERGER, “On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation,” *Int. J. Sol. Energy*, doi: 10.1080/01425918208909875.
- [11] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, and Y. Ferard, “Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes,” *Renew. Energy*, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>.
- [12] H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, and C. Dupraz, “Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels,” *Eur. J. Agron.*, vol. 44, pp. 54–66, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.EJA.2012.08.003.
- [13] M. Laub, L. Pataczek, A. Feuerbacher, S. Zikeli, and P. Högy, “Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems: a meta-analysis,” doi: 10.1007/s13593-022-00783-7/Published.
- [14] S. M. Lu *et al.*, “Photosynthetically active radiation decomposition models for agrivoltaic systems applications,” *Sol. Energy*, vol. 244, pp. 536–549, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.05.046.

- [15] J. S. Pulido-Mancebo, R. López-Luque, L. M. Fernández-Ahumada, J. C. Ramírez-Faz, F. J. Gómez-Uceda, and M. Varo-Martínez, “Spatial Distribution Model of Solar Radiation for Agrivoltaic Land Use in Fixed PV Plants,” *Agron. 2022, Vol. 12, Page 2799*, vol. 12, no. 11, p. 2799, Nov. 2022, doi: 10.3390/AGRONOMY12112799.
- [16] D. Yajima, T. Toyoda, M. Kirimura, K. Araki, Y. Ota, and K. Nishioka, “Estimation Model of Agrivoltaic Systems Maximizing for Both Photovoltaic Electricity Generation and Agricultural Production,” *Energies 2023, Vol. 16, Page 3261*, vol. 16, no. 7, p. 3261, Apr. 2023, doi: 10.3390/EN16073261.
- [17] S. Zainali *et al.*, “Direct and diffuse shading factors modelling for the most representative agrivoltaic system layouts,” 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120981.
- [18] B. Willockx, C. Lavaert, and J. Cappelle, “Performance evaluation of vertical bifacial and single-axis tracked agrivoltaic systems on arable land,” 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119181.
- [19] H. Marrou, L. Guilioni, L. Dufour, C. Dupraz, and J. Wery, “Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?,” *Agric. For. Meteorol.*, vol. 177, pp. 117–132, Aug. 2013, doi: 10.1016/J.AGRFORMET.2013.04.012.
- [20] Y. Elamri, B. Cheviron, J. M. Lopez, C. Dejean, and G. Belaud, “Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces,” *Agric. Water Manag.*, vol. 208, pp. 440–453, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.AGWAT.2018.07.001.
- [21] E. Hassanpour, A. Id, J. S. Selker, and C. W. Higgins, “Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency,” 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0203256.
- [22] T. Sekiyama and A. Nagashima, “Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop,” doi: 10.3390/environments6060065.
- [23] L. F. S. Greg A. Barron-Gafford, Mitchell A. Pavao-Zuckerman, Rebecca L. Minor, K. D. Isaiah Barnett-Moreno, Daniel T. Blackett, Moses Thompson, A. K. Gerlak, and G. P. N. and J. E. Macknick, “Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands,” *Nat. Sustain.*, 2019.
- [24] H. A. Al-Agele, K. Proctor, G. Murthy, and C. Higgins, “A Case Study of Tomato (*Solanum lycopersicon* var. Legend) Production and Water Productivity in Agrivoltaic Systems,” 2021, doi: 10.3390/su13052850.
- [25] A. Weselek *et al.*, “Effects on Crop Development, Yields and Chemical Composition of Celeriac (*Apium graveolens* L. var. rapaceum) Cultivated Underneath an Agrivoltaic System,” 2021, doi: 10.3390/agronomy11040733.

- [26] A. Weselek, A. Bauerle, J. Hartung, S. Zikeli, I. Lewandowski, and P. Högy, “Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate,” doi: 10.1007/s13593-021-00714-y/Published.
- [27] M. Abdullah Al Mamun, I. Ibrahim Garba, S. Campbell, P. Dargusch, P. deVoil, and A. Abdul Aziz, “Biomass production of a sub-tropical grass under different photovoltaic installations using different grazing strategies Agrivoltaic APSIM model Biomass production Grazing strategy Photovoltaic installations,” *Agric. Syst.*, vol. 208, p. 103662, 2023, doi: 10.1016/j.agsy.2023.103662.
- [28] H. Dinesh and J. M. Pearce, “The potential of agrivoltaic systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 299–308, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.10.024.
- [29] N. C. Giri and R. C. Mohanty, “Design of agrivoltaic system to optimize land use for clean energy-food production: a socio-economic and environmental assessment,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 24, no. 8, pp. 2595–2606, Oct. 2022, doi: 10.1007/S10098-022-02337-7.
- [30] J. Cai, D. P. Makris, U. Jamil, and J. M. Pearce, “Maximizing Biomass with Agrivoltaics: Potential and Policy in Saskatchewan Canada,” *Biomass 2023, Vol. 3, Pages 188-216*, vol. 3, no. 2, pp. 188–216, Jun. 2023, doi: 10.3390/BIOMASS3020012.
- [31] Z. Glasnovic and J. Margeta, “A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 7, pp. 904–916, Jul. 2007, doi: 10.1016/J.SOLENER.2006.11.003.
- [32] A. Nikzad, M. Chahartaghi, and M. H. Ahmad, “Technical, economic, and environmental modeling of solar water pump for irrigation of rice in Mazandaran province in Iran: A case study,” *J. Clean. Prod.*, 2019.
- [33] J. Montero, M. A. Moreno, and J. Cervera-gasc, “An intelligent irrigation management model for direct injection of solar pumping systems,” vol. 279, no. August 2022, 2023, doi: 10.1016/j.agwat.2023.108182.
- [34] N. Naval and J. M. Yusta, “Comparative assessment of different solar tracking systems in the optimal management of PV-operated pumping stations,” vol. 2022, pp. 960–1481, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.10.007.
- [35] A. Hilali, Y. Mardoude, A. Essahlaoui, A. Rahali, and N. El Ouanjli, “Migration to solar water pump system: Environmental and economic benefits and their optimization using genetic algorithm Based MPPT,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 10144–10153, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.08.017.
- [36] M. Yaichi, A. Tayebi, A. Mammeri, and A. Boutadara, “Performance of a PV field’s discontinuous two-position sun tracker systems supplying a water pumping system: Concept, theoretical and experimental studies – A case study of the Adrar area in Algeria’s Sahara,” *Renew. Energy*, vol. 201, no. P1, pp. 548–562, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.10.095.

- [37] A. P. Rizi, A. Ashrafzadeh, and A. Ramezan, “A financial comparative study of solar and regular irrigation pumps: Case studies in eastern and southern Iran,” 2019.
- [38] S. Jiang *et al.*, “Effects of different photovoltaic shading levels on kiwifruit growth, yield and water productivity under ‘agrivoltaic’ system in Southwest China,” *Agric. Water Manag.*, vol. 269, p. 107675, 2022, doi: 10.1016/j.agwat.2022.107675.
- [39] Y. Bakelli, A. H. Arab, and B. Azoui, “Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 2, pp. 288–294, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.11.023>.
- [40] S. Habib *et al.*, “Technical modelling of solar photovoltaic water pumping system and evaluation of system performance and their socio-economic impact,” 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16105.
- [41] P. E. Campana, Y. Zhu, E. Brugiati, H. Li, and J. Yan, “PV water pumping for irrigation equipped with a novel control system for water savings,” 2014.
- [42] X. Gao *et al.*, “Feasibility evaluation of solar photovoltaic pumping irrigation system based on analysis of dynamic variation of groundwater table,” *Appl. Energy*, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.074>.
- [43] I.K.Okakwu, A. S. Alayande, D. O. Akinyele, O. E. Olabode, and J. O. Akinyemi, “Effects of total system head and solar radiation on the techno-economics of PV groundwater pumping irrigation system for sustainable agricultural production,” *Sci. African*, 2022.
- [44] B. Patel, B. Gami, V. Baria, A. Patel, and P. Patel, “Co-generation of solar electricity and agriculture produce by photovoltaic and photosynthesis-dual model by Abellon, India,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 141, no. 3, Jun. 2019, doi: 10.1115/1.4041899.
- [45] R. M. Ramli and W. A. Jabbar, “Design and implementation of solar-powered with IoT-Enabled portable irrigation system,” *Internet Things Cyber-Physical Syst.*, vol. 2, no. December, pp. 212–225, 2022, doi: 10.1016/j.iotcps.2022.12.002.
- [46] P. Abhilash, R. Nanda Kumar, and R. Praveen Kumar, “Solar powered water pump with single axis tracking system for irrigation purpose,” doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.336.
- [47] J. Vishnupriyan, P. Partheeban, A. Dhanasekaran, and M. Shiva, “Analysis of tilt angle variation in solar photovoltaic water pumping system,” doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.353.
- [48] P. Caton, “Design of rural photovoltaic water pumping systems and the potential of manual array tracking for a West-African village,” 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.02.024.
- [49] M. V. Miguel, *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*, 2nd ed. Madrid, ES.
- [50] M. A. Ramírez Agudo, *Energía Solar Fotovoltaica*, 1st ed. 2019.

- [51] DOF - Diario Oficial de la Federación, “Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables,” *Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables*. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5101826 (accessed Dec. 14, 2022).
- [52] J. F. Armendáriz López, A. Luna León, and González Trevizo, “TRNSYS COMO HERRAMIENTA PARA EVALUAR RECURSO SOLAR, CASO MEXICALI, BAJA CALIFORNIA.,” 2014. Accessed: Dec. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/274960895_TRNSYS_COMO_HERRAMIENTA_PARA_EVALUAR_RECURSO_SOLAR_CASO_MEXICALI_BAJA_CALIFORNIA.
- [53] J. C. Casas Raygoza, “Desalinización en zonas áridas costeras, con tecnología que utiliza energía solar de forma pasiva,” 2021.
- [54] F. Rodríguez Mas, A. Ruiz Gómez, and D. Valiente García, “Apuntes Sobre la Energía Fotovoltaica,” 2022.
- [55] J. M. Méndez Muñoz and R. Cuervo García, *Energía Solar Fotovoltaica*. FC. Editorial, 2009.
- [56] O. Perpiñán Lamigueiro, *Energía Solar Fotovoltaica*, vol. 1. 2020.
- [57] D. Blas Martínez, “Instalación de paneles fotovoltaicos en Bosal S.A.,” Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, 2011.
- [58] J. I. Alonso Montes *et al.*, *Energía Solar Fotovoltaica*. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2002.
- [59] S. L. I. y Cuantificación, *Montaje eléctrico y electrónico en instalaciones solares fotovoltaicas. ENAE0108*, IC Editori. 2017.
- [60] Fuji Electric España, “¿Conoces los distintos tipos de bombeo solar? .” <https://fujielectricspain.com/actualidad/conoces-los-distintos-tipos-de-bombeo-solar/> (accessed Apr. 11, 2024).
- [61] UNAM, “Bombas,” Ciudad de México, p. 44.
- [62] O. P. de la Salud, *Guía de diseño de estaciones de bombeo de agua potable*. 2005.
- [63] S. R. Gliessman, *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. 1998.
- [64] C. Cohen Manrique, “Modelamiento del microclima y las estrategias de control para cultivos hortofrutícolas en las sabanas de departamento de Sucre,” Universidad Tecnológica de Bolívar, 2013.
- [65] J. M. Caborn, “Microclimas.” p. 4.
- [66] FAO, “Evapotranspiración del Cultivo.”
- [67] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, “En la agricultura, los sistemas

de riego son utilizados para un aprovechamiento óptimo del agua.”
<https://www.gob.mx/siap/articulos/en-la-agricultura-los-sistemas-de-riego-son-utilizados-para-un-aprovechamiento-optimo-del-agua?idiom=es> (accessed Apr. 11, 2024).

- [68] J. Machena, “Generalidades de los sistemas de riego,” *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 6, no. 1, pp. 51–66, 2017.
- [69] C. J. Torrente, J. Reza, R. López-Luque, J. Martínez, and F. J. Casares, “Simulation model to analyze the spatial distribution of solar radiation in agrivoltaic Mediterranean greenhouses and its effect on crop water needs,” *Appl. Energy*, vol. 353, p. 122050, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2023.122050.
- [70] H. J. Williams, K. Hashad, H. Wang, and K. Max Zhang, “The potential for agrivoltaics to enhance solar farm cooling,” *Appl. Energy*, vol. 332, p. 120478, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.120478.
- [71] T. Reher *et al.*, “Potential of sugar beet (*Beta vulgaris*) and wheat (*Triticum aestivum*) production in vertical bifacial, tracked, or elevated agrivoltaic systems in Belgium,” *Appl. Energy*, vol. 359, p. 122679, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.122679.
- [72] B. Willockx, C. Lavaert, and J. Cappelle, “Geospatial assessment of elevated agrivoltaics on arable land in Europe to highlight the implications on design, land use and economic level,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8736–8751, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.EGYR.2022.06.076.
- [73] K. Biró-Varga, I. Sirnik, and S. Stremke, “Landscape user experiences of interspace and overhead agrivoltaics: A comparative analysis of two novel types of solar landscapes in the Netherlands,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 109, p. 103408, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.ERSS.2023.103408.
- [74] K. Leuven, “Agrivoltaics KU Leuven.”
<https://iiw.kuleuven.be/apps/agrivoltaics/kpi.html> (accessed Jan. 13, 2025).
- [75] I. A. Ramos-Fuentes, Y. Elamri, B. Cheviron, C. Dejean, G. Belaud, and D. Fumey, “Effects of shade and deficit irrigation on maize growth and development in fixed and dynamic AgriVoltaic systems,” *Agric. Water Manag.*, vol. 280, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.AGWAT.2023.108187.
- [76] S. Amaducci, X. Yin, and M. Colauzzi, “Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production,” *Appl. Energy*, vol. 220, pp. 545–561, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.03.081.
- [77] F. I. for S. E. Systems, “Hofgemeinschaft Heggelbach.” <https://www.ise.solar-monitoring.de/system.php?system=apvh&undersystem=0&lang=en> (accessed Sep. 11, 2024).
- [78] H. Jo *et al.*, “Comparison of Yield and Yield Components of Several Crops Grown under Agro-Photovoltaic System in Korea,” *Agric. 2022, Vol. 12, Page 619*, vol. 12,

no. 5, p. 619, Apr. 2022, doi: 10.3390/AGRICULTURE12050619.

- [79] M. Kadowaki, A. Yano, F. Ishizu, T. Tanaka, and S. Noda, “Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth,” *Biosyst. Eng.*, vol. 111, no. 3, pp. 290–297, 2012, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.12.006.
- [80] A. Scarano *et al.*, “Effects of the Agrivoltaic System on Crop Production: The Case of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.),” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 7, 2024, doi: 10.3390/app14073095.
- [81] K. Ezzaeri *et al.*, “Performance of photovoltaic canarian greenhouse: A comparison study between summer and winter seasons,” *Sol. Energy*, vol. 198, no. September 2019, pp. 275–282, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.01.057.
- [82] S. Mohammedi, G. Dragonetti, N. Admane, and A. Fouial, “The Impact of Agrivoltaic Systems on Tomato Crop: A Case Study in Southern Italy,” *Processes*, vol. 11, no. 12, 2023, doi: 10.3390/pr11123370.
- [83] S. H. Chae, H. J. Kim, H. W. Moon, Y. H. Kim, and K. M. Ku, “Agrivoltaic Systems Enhance Farmers’ Profits through Broccoli Visual Quality and Electricity Production without Dramatic Changes in Yield, Antioxidant Capacity, and Glucosinolates,” *Agronomy*, vol. 12, no. 6, p. 1415, Jun. 2022, doi: 10.3390/AGRONOMY12061415/S1.
- [84] S. Gautam, D. B. Das, and A. K. Saxena, “Economic indicators evaluation to study the feasibility of a solar agriculture farm: A case study,” *Sol. Compass*, vol. 10, p. 100074, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.SOLCOM.2024.100074.
- [85] H. Marrou *et al.*, “Designing farming systems combining food and electricity production,” *Sol. Compass*, vol. 10, no. April, p. 100074, 2024, doi: 10.1016/j.solcom.2024.100074.
- [86] A. Tani, S. Shiina, K. Nakashima, and M. Hayashi, “Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels,” *J. Agric. Meteorol.*, vol. 70, no. 3, pp. 139–149, 2014, doi: 10.2480/agrmet.D-14-00005.
- [87] R. C and F. E, “The spatial socio-technical potential of agrivoltaics in Germany,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 202, p. 114706, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2024.114706.
- [88] “Solar energy Colorado | Jack’s Solar Garden, LLC | United States.” <https://www.jackssolargarden.com/> (accessed Oct. 06, 2023).
- [89] A. A. Reeza, N. F. M. Noor, O. H. Ahmed, and M. A. Masuri, “Shading Effect of Photovoltaic Panels on Growth of Selected Tropical Vegetable Crops,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 324, no. October 2023, p. 112574, 2024, doi: 10.1016/j.scienta.2023.112574.
- [90] T. Setyorini *et al.*, “Mustard (*Brassica rapa*) and Eggplant (*Solanum melongena*) Cultivation in Agrivoltaic System in Coastal Area, Case Study of Baron Technopark, Yogyakarta,” *J. Agron. Tanam. Trop.*, vol. 6, no. 2, 2024, doi:

10.36378/juatika.v6i2.3570.

- [91] G. N. Nguyen, N. Lantzke, and A. van Burgel, “Effects of Shade Nets on Microclimatic Conditions, Growth, Fruit Yield, and Quality of Eggplant (*Solanum melongena* L.): A Case Study in Carnarvon, Western Australia,” *Horticulturae*, vol. 8, no. 8, 2022, doi: 10.3390/horticulturae8080696.
- [92] M. Trommsdorff, P. Elia Campana, J. Macknick, Á. Fernández Solas, S. Gorijan, and I. Tsanakas, “Dual Land Use for Agriculture and Solar Power Production: Overview and Performance of Agrivoltaic Systems,” 2025.
- [93] CONABIO, “Capítulo 3. Clima,” pp. 33–58, 2006.
- [94] INEGI, “Climas,” 2020.
- [95] INEGI, “Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas, Escala 1:1000000,” 2018.
- [96] INEGI, “Clima Baja California,” *Cuéntame de México*.
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/territorio/clima.aspx?tema=me&e=02#:~:text=Predomina el clima Muy seco,de 18 a19 °C>.
- [97] INEGI, “Agricultura,” *Cuentame de México*, 2020.
<https://cuentame.inegi.org.mx/economia/primarias/agri/default.aspx?tema=e#sp>.
- [98] SADER, “Cinco estados con cinco estrellas en producción agrícola,” 2021.
<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cinco-estados-con-cinco-estrellas-en-produccion-agricola>.
- [99] SADER, “Regiones agroalimentarias de México,” 2021.
<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/114943?tab=>.
- [100] INEGI, “Síntesis geográfica de Baja California,” pp. 33–37.
- [101] B. A. Ruiz and R. V. Llamas, “La adopción de estándares en el sector hortícola de Baja California,” *Estud. Front. nueva época*, vol. 11, pp. 171–202, 2010.
- [102] CONAVI, “Clima muy seco.”
- [103] SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, “ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE BAJA CALIFORNIA,” 2024.
- [104] P. Friesen, “At what light intensity should I grow my plants?” p. 3, 2024.
- [105] X. Ke, H. Yoshida, S. Hikosaka, and E. Goto, “Optimization of photosynthetic photon flux density and light quality for increasing radiation-use efficiency in dwarf tomato under led light at the vegetative growth stage,” *Plants*, vol. 11, no. 1, p. 121, Jan. 2022, doi: 10.3390/PLANTS11010121/S1.
- [106] Vegetable Academy, “A Definitive Grow Light Study,” 2020.
<https://www.vegetableacademy.com/post/a-definitive-grow-light-study> (accessed

May 12, 2025).

- [107] H. M. Andersen, “¿Cuántos $\mu\text{mol}/\text{PPFD}$ necesita mi planta para prosperar?,” 2024. [https://plantelys-dk.translate.google.com/en/how-many- \$\mu\text{mol}\$ -does-my-plant-need-to-thrive/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge](https://plantelys-dk.translate.google.com/en/how-many-umol-does-my-plant-need-to-thrive/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge) (accessed May 12, 2025).
- [108] Urban Leaf, “How to Grow Zucchini Indoors ,” 2021. https://www.geturbanleaf.com/blogs/vegetables/how-to-grow-zucchini-indoors?srsltid=AfmBOoq_0s1vAplafnoddFqbwV4z1unUsRPmpwrZlGpI4ZkUViT66sC (accessed May 12, 2025).
- [109] G. Pennisi *et al.*, “Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 272, p. 109508, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2020.109508.
- [110] L. Halleck, “Can I Grow Carrots Indoors With Grow Lights?,” 2021. <https://lesliehalleck.com/blog/can-i-grow-carrots-indoors-with-grow-lights> (accessed May 12, 2025).
- [111] Photone, “Light Requirements for Plants: Find Your Plant’s PPFD and DLI,” 2025. <https://growlightmeter.com/light-requirements-for-plants/> (accessed May 12, 2025).
- [112] CONANP, “¿Sabes cuánta agua consumes?,” 2019. <https://www.gob.mx/conanp/articulos/sabes-cuanta-agua-consumes> (accessed Dec. 30, 2025).
- [113] “Index of /da/CNE/DATOS ABIERTOS (GASOLINAS Y DIÉSEL).” [https://www.cne.gob.mx/da/CNE/DATOS ABIERTOS \(GASOLINAS Y DIÉSEL\)/](https://www.cne.gob.mx/da/CNE/DATOS_ABIERTOS_(GASOLINAS_Y_DIÉSEL)/) (accessed Jan. 03, 2026).
- [114] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), “Anuario Estadístico de la Producción Agrícola,” 2023. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.
- [115] J. Zarco, “Chiles serranos y paneles solares. Primeras experiencias entre la agricultura y la fotovoltaica en México ,” Mar. 06, 2023. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/03/06/chiles-serranos-y-paneles-solares-primeras-experiencias-entre-la-agricultura-y-la-fotovoltaica-en-mexico/> (accessed May 26, 2024).
- [116] S. Kim, S. Kim, and K. An, “An integrated multi-modeling framework to estimate potential rice and energy production under an agrivoltaic system,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 213, no. June, p. 108157, 2023, doi: 10.1016/j.compag.2023.108157.
- [117] R. A. Gonocruz *et al.*, “Analysis of the Rice Yield under an Agrivoltaic System: A Case Study in Japan,” *Environ. 2021, Vol. 8, Page 65*, vol. 8, no. 7, p. 65, Jul. 2021, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS8070065.
- [118] C. Sponagel, A. Feuerbacher, D. Bendel, T. Karl, D. Weber, and E. Bahrs, “Economic and Agronomic Impacts of Agrivoltaics on Arable Land Use at the Example of the Stuttgart Region,” *Ger. J. Agric. Econ.*, vol. 72, no. 2, May 2023,

doi: 10.30430/GJAE.2023.0334.

- [119] H. Helsen *et al.*, “Crop Response to Agrivoltaics in Soft Fruit Production,” Accessed: Jan. 13, 2025. [Online]. Available: www.sunbiose.nl.
- [120] M. I. Hermelink, B. Maestrini, and F. J. de Ruijter, “Berry shade tolerance for agrivoltaics systems: A meta-analysis,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 330, no. December 2023, p. 113062, 2024, doi: 10.1016/j.scienta.2024.113062.
- [121] D. Matulić *et al.*, “Agrivoltaics and Aquavoltaics: Potential of Solar Energy Use in Agriculture and Freshwater Aquaculture in Croatia,” *Agric.*, vol. 13, no. 7, 2023, doi: 10.3390/agriculture13071447.

Anexos

Anexo A

Ficha técnica de la bomba LORENTZ PSk2-70 C-SJ150-5-1

PSk2-70 C-SJ150-5-1

Solar Submersible Pump System for 10" wells

System Overview

Head: max. 150 m
Flow rate: max. 229 m³/h

Technical Data

Controller PSk2-70

- High efficiency solar pump controller
- Input for water meter, pressure sensors, digital switches
- Simple configuration with LOKALIZ & Multiplicador Android™ App
- Optional data logging and system monitoring
- Input applications for constant pressure, constant flow and daily output
- Integrated Sun Sensor
- Active temperature management
- Integrated MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Power: max. 50 kW
Input voltage: max. 800 V
Operation temp.: -25°C
Max. current: max. 115 A
Efficiency: max. 99%
Ambient temp.: -10...50 °C
Ingress class: IP54

Motor AC DRIVE SUB 8" 55kW

- High efficiency 4 phase AC motor
- Frequency: 36...52 Hz
- Frame material: stainless steel AISI 304
- No lubricants in the motor
- Max. efficiency: max. 94%
- Max. speed: 1 065...2 045 rpm
- Power factor: 0,95
- Ingress class: IP68
- Frame class: F54
- Submersion: max. 150 m

Pump End PE C-SJ150-5-1

- Hot return valve
- Hot/cold materials, stainless steel AISI 304
- Control valve

Efficiency: max. 78 %

Pump Unit PSk2-70 C-SJ150-5-1 (Motor, Pump End)

Electric diameter: max. 3.8 m
Water temperature: max. 35 °C

Standards

CE 2007/2002/EC, 2006/90/EC, 2006/95/EC
LVD, EMC, RoHS, REACH, IEC 60335-1, IEC 60335-2-10

THE KEYS SHOWN IN THIS APPROVAL APPROVE THAT THIS UNIT QUALIFIES FOR ITS PRODUCT CATEGORY. PRODUCTS AND CERTIFICATES ARE NOT APPROVED SPECIFICALLY FOR THIS MARKET.
*Always refer to the manufacturer's Standard Red Catalogue (SRT) for CE mark compliance. **1°C cell temperature.
***Peculiar to certain markets for 10" to 12" well diameter well pumps.

Sun. Water. Life.

PSk2-70 C-SJ150-5-1

Solar Submersible Pump System for 10" wells

Pump Chart

Dimensions and Weights

Controller	Pump Unit
H = 80 mm	L x L x H = 210 x 210 x 110 mm
W = 80 mm	U = 150 mm
W = 80 mm	D = 100 mm
W = 80 mm	F = 70 mm
U = 10 mm	S = 6"
U = 40 mm	

	Net weight
Controller	82 kg
Pump Unit	205 kg
Motor	186 kg
Pump End	115 kg

*Netp. MPPT voltage under Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m² solar irradiance, 25 °C cell temperature.

Sun. Water. Life.

Figura 69. Ficha técnica del sistema de bombeo instalado en el sitio de estudio.

Anexo B

Ficha técnica del microinversor YC600B-NA



Liderando la Industria
Solar con tecnología de microinversores



YC600B-NA
Microinversor

- Microinversor de módulo doble con MPPT independiente por panel
- 550VA de potencia de salida continua máxima
- Acomoda módulos fotovoltaicos de 60 y 72 celdas de hasta 375W +
- Conecta a la red de 120V ó 127V
- Comunicación inalámbrica estable

DIMENSIONES



YC600B fue diseñado para acomodar los paneles FV de alta potencia de salida de la actualidad, ofreciendo una capacidad mejorada y está alineado a los últimos estándares de cumplimiento de la red. Al ofrecer una potencia de salida máxima de 300 VA por canal, el YC600B funciona con módulos fotovoltaicos de 60 y 72 celdas y viene con MPPT doble e independiente por panel. El YC600B también opera dentro de un rango de voltaje MPPT más amplio que sus competidores para una mayor cosecha de energía.

Esquema de cableado



Ficha técnica YC600B microinversor	
Región	LATAM
Datos de entrada (CC)	
Potencia recomendada de módulo FV	250Wp-375Wp+
Rango de voltaje MPPT	22V-48V
Rango de voltaje de operación	16V-60V
Voltaje de entrada máximo	60V
Corriente de entrada máxima	12A x 2
Corriente de cortocircuito de entrada	13.2A
Datos de salida (CA)	
Potencia máxima de salida continua	550VA
Potencia pico de salida	600VA
Voltaje de salida nominal	120V/ 95-155V
Rango de voltaje de salida ajustable	90V-160V
Corriente de salida nominal	4.57A
Unidades máximas por sucursal	3units per 20A AC breaker / 4units per 25A AC breaker
Frecuencia de salida nominal	60Hz/ 57-62Hz
Rango de frecuencia de salida ajustable	55 Hz-64.9Hz
Factor de potencia	>0.99
Distorsión armónica total	<3%
Eficiencia	
Eficiencia máxima	95%
Eficiencia de CEC	96.5%
Nominal MPPT eficiencia	99.5%
Consumo de energía nocturno	20mW
Datos mecánicos	
Rango de temperatura ambiental	-40 °F to +149 °F (-40 °C to +65 °C)
Rango de temperatura de almacenamiento	-40 °F to +185 °F (-40 °C to +85 °C)
Dimensiones (A x L x P)	10.3" x 7.4" x 1.3" (260mm X 188mm X 31.5mm)
Peso	5.7lbs (2.6kg)
Corriente máxima del bus de CA	20A (2.5mm ²)
Tipo de conector	MCA Type
Enfriamiento	Convección natural - Sin ventiladores
Clasificación ambiental del recinto	TYEP 6/ IP67
Características	
Comunicación (Inversor para ECU)	Wireless
Diseño de transformador	High Frequency Transformers, Galvanically Isolated
Monitoreo	Via EMA* Online Portal
Certificado de cumplimiento	
Certificados	UL1741; CSA C22.2 No. 1071-16; IEC61547

* APsystems en línea Energy Management Analysis (EMA) plataforma

Especificaciones sujetas a cambios sin previo aviso - asegúrese de que está utilizando la actualización más reciente se encuentra en latam.APsistemas.com

APsystems en Guadalajara:
AV. Lazaro Cardenas 2850-5º Piso, Colonia Jardines del Bosque C.P. 44520, Guadalajara, Jalisco
+52 1 33 3188 4604 | 01 800 890 6030
info.latam@apsistemas.com | latam.APsistemas.com

Figura 70. Ficha técnica del inversor de corriente utilizado en las pruebas experimentales.

Anexo C

Ficha técnica de la estación meteorológica Davis Vantage Pro2

Wireless Vantage Pro2™ & Vantage Pro2™ Plus Stations (Including Fan-Aspirated Models)



6152 6162
6153 6163

Vantage Pro2™ (6152, 6153) and Vantage Pro2™ Plus (6162, 6163) Wireless Weather Stations include two components: the Integrated Sensor Suite (ISS) which houses and manages the external sensor array, and the console which provides the user interface, data display, and calculations. The ISS and Vantage Pro2 console communicate via an FCC-certified, license-free, spread-spectrum frequency-hopping (FHSS) transmitter and receiver. User-selectable transmitter ID codes allow up to eight stations to coexist in the same geographic area. The frequency hopping spread spectrum technology provides greater communication strength over longer distances and areas of weaker reception. The Wireless Vantage Pro2 Plus weather station includes two additional sensors that are optional on the Vantage Pro2: the UV sensor and the solar radiation sensor.

The console may be powered by batteries or by the included AC-power adapter. The wireless ISS is solar powered with a battery backup. Use WeatherLink® for Vantage Pro2 and Vantage Pro2 Plus to let your weather station interface with a computer, to log weather data, and to upload weather information to the internet.

The 6152 and 6162 rely on passive shielding to reduce solar-radiation induced temperature errors in the outside temperature sensor readings. The Fan-aspirated 6153 and 6163 combine passive shielding with a solar-powered fan that draws outside air in over the temperature and humidity sensors, providing a much more accurate temperature reading than that available using passive shielding alone.

Integrated Sensor Suite (ISS)

(Include product numbers: 6152, 6153, 6162, 6163, 6322, 6323, 6327 & 6328)

Operating Temperature	-40° to +150°F (-40° to +60°C)
Non-Operating Temperature	-40° to +150°F (-40° to +70°C)
Current Draw (ISS SIM only)	0.14 mA (average), 30 mA (peak) at 4 to 6 VDC
Solar Power Panel	0.5 Watts (ISS SIM), plus 0.75 Watts (Fan-Aspirated)
Battery (ISS SIM / Fan-Aspirated)	CR-123 3-Volt Lithium coin / 2 - 1.2 Volt NiMH C-cells
Battery Life (3-Volt Lithium coin)	8 months without sunlight - greater than 2 years depending on solar charging
Battery Life (NiMH C-cells, Fan-Aspirated)	Up to 2 years
Fan Aspiration Rate (Fan-Aspirated only)	
Intake Flow Rate, full sun	190 feet/min. (0.9 m/s)
Intake Flow Rate, battery only	80 feet/min. (0.4 m/s)
Sensor Chamber Flow Rate, full sun	500 feet/min. (2.5 m/s)
Sensor Chamber Flow Rate, battery only	180 feet/min. (0.9 m/s)
Connectors, Sensor	Modular RJ-11
Cable Type	4-conductor, 26-AWG
Cable Length, Anemometer	40 feet (12 m) (included) 240 feet (73 m) (maximum recommended)

Note: Maximum allowable wind decreases in the length of cable increases. At 140' (42 m) of cable, the maximum wind speed displayed is 135 mph (60 m/s); at 240' (73 m), the maximum wind speed displayed is 100 mph (34 m/s).

Wind Speed Sensor	Solid state magnetic sensor
Wind Direction Sensor	Wind vane with potentiometer
Rain Collector Type	Tipping bucket, 0.01" per tip (0.2 mm with metric rain adapter), 33.2 in ² (214 cm ²) collection area
Temperature Sensor Type	PN Junction Silicon Diode
Relative Humidity Sensor Type	Film capacitor element
Housing Material	UV-resistant ABS, ASA plastic (SPARS only)

ISS Dimensions (not including anemometer or bird spikes)

DAVIS | Davis Instruments 3465 Dublin Ave., Hayward, CA 94545-2778 USA | DS6152_62_53_63_Rev F 6/2007/0
1510 713-3229 • FAX 1510 870-0849 • info@davisinst.com • www.davisinst.com

Wireless Vantage Pro2™

Barometric Pressure

Resolution and Units	0.01" Hg, 0.1 mm Hg, 0.1 hPa/mbar (user-selectable)
Range	18.00" to 32.50" Hg, 410 to 820 mm Hg, 540 to 1100 hPa/mbar
Elevation Range	-999' to +15,000' (+400' to 4570 m) (note that console screen limits entry of lower elevation to -999' when using feet as elevation unit.)
Uncorrected Reading Accuracy	±0.03" Hg (±0.8 mm Hg, ±1.0 hPa/mbar) (at room temperature)
Sea Level Reduction Equation Used	United States Method employed prior to use of current "R Factor" method
Equation Source	Smithsonian Meteorological Tables
Equation Accuracy	±0.01" Hg (±0.3 mm Hg, ±0.3 hPa/mbar)
Elevation Accuracy Required	±10' (3m) to meet equation accuracy specification
Overall Accuracy	±0.03" Hg (±0.8 mm Hg, ±1.0 hPa/mbar)
Trend (change in 3 hours)	Change 0.08" (2 hPa/mbar), 1.5 mm Hg: Rapidly Change 0.02" (0.7 hPa/mbar), 0.5 mm Hg: Slowly
Trend Indication	5 position arrow: Rising (rapidly or slowly), Steady, or Falling (rapidly or slowly)
Update Interval	1 minute or when console BAR key is pressed twice
Current Display	Instant
Current Graph Data	Instant, 15-min, and Hourly Reading, Daily, Monthly, High and Low
Historical Graph Data	15-min, and Hourly Reading, Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High Threshold from Current Trend for Storm Clearing (Rising Trend) Low Threshold from Current Trend for Storm Warning (Falling Trend)
Range for Rising and Falling Trend Alarms	0.01 to 0.25" Hg (0.1 to 6.4 mm Hg, 0.1 to 8.5 hPa/mbar)

Clock

Resolution	1 minute
Units	Time: 12 or 24 hour format (user-selectable)
Date	US or International format (user-selectable)
Accuracy	±8 seconds/month
Adjustments	Time: Automatic Daylight Savings Time (for users in North America and Europe that observe it in ALTO mode, MANUAL setting available for all other areas) Date: Automatic Leap Year
Alarms	Once per day at set time when active

Dewpoint (calculated)

Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-105° to +130°F (-70° to +54°C)
Accuracy	±2°F (±1°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Source	World Meteorological Organization (WMO)
Equation Used	WMO Equation with respect to saturation of moist air over water
Variables Used	Instant Outside Temperature and Instant Outside Relative Humidity
Current Display Data	Instant Calculation
Current Graph Data	Instant Calculation, Daily, Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Calculations, Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Threshold from Instant Calculation

Evapotranspiration (calculated, requires solar radiation sensor)

Resolution and Units	0.01" or 0.1 mm (user-selectable)
Range	Daily to 32.67" (832.1 mm), Monthly & Yearly to 199.90" (1999.9 mm)
Accuracy	Greater of 0.01" (0.25 mm) or 5%, Reference: side-by-side comparison against a CIMIS ET weather station
Update Interval	1 hour
Calculation and Source	Modified Panman Equation as implemented by CIMIS (California Irrigation Management Information System) including Net Radiation calculation
Current Display Data	Latest Hourly Total Calculation
Current Graph Data	Hourly, Daily, Monthly, Yearly Totals
Historical Graph Data	Hourly, Daily, Monthly, Yearly Totals
Alarm	High Threshold from Latest Daily Total Calculation

Wireless Vantage Pro2™

Vantage Pro2 with Standard Rad Shield	14.0" x 9.4" x 14.5" (356 mm x 239 mm x 368 mm)
Vantage Pro2 with Fan-Aspirated Rad Shield	20.8" x 9.4" x 16.0" (528 mm x 239 mm x 406 mm)
Vantage Pro2 Plus with Standard Rad Shield	14.3" x 9.7" x 14.5" (363 mm x 246 mm x 368 mm)
Vantage Pro2 Plus with Fan-Aspirated Rad Shield	21.1" x 9.7" x 16.0" (538 mm x 246 mm x 406 mm)

Console

(Include product number 6322)

Console Operating Temperature	+32° to +140°F (0° to +60°C)
Non-Operating (Storage) Temperature	+14° to +150°F (-10° to +70°C)
Current Draw	0.9 mA Average, 30 mA peak, (add 120 mA for display lamps, add 0.125 mA for each optional wireless transmitter received by the console) at 4 - 6 VDC
AC Power Adapter	5 VDC, 300 mA, regulated
Batteries	3 C-cells
Battery Life	Up to 9 months
Connectors	Modular RJ-11
Housing Material	UV-resistant ABS plastic
Console Display Type	LED Transreflective
Display Backlight	LEDs
Console Dimensions	
Console with antenna down (L x H x D)	10.625" x 6.125" x 1.625" (270 mm x 156 mm x 41 mm)
Console with antenna extended up (L x H x D)	10.625" x 9.625" x 1.625" (270 mm x 246 mm x 41 mm)
Display (L x H)	5.94" x 3.375" (151 mm x 86 mm)
Weight (with batteries)	1.88 lbs. (85 kg)

Data Displayed on Console

Data display categories are listed with General first, then in alphabetical order.

General

Historical Data	Includes the past 24 values listed unless otherwise noted, all can be cleared and all dates reset
Daily Data	Includes the earliest time of occurrence of highs and lows; period begins/ends at 12:00 am
Monthly Data	Period begins/ends at 12:00 am on the first of the month
Yearly Data	Period begins/ends at 12:00 am on the first of January unless otherwise noted
Current Display Data	Current display data describes the current reading for each weather variable. In most cases, the variable lists the most recently updated reading or calculation. Some current variable displays can be adjusted so there is an offset for the reading
Current Graph Data	Current graph data appears in the right-most column in the console graph and represents the latest value within the last period on the graph. Icons can be set or reset. Display intervals vary. Examples include: Instant, 15-min, and Hourly Reading, Daily, Monthly, High and Low
Graph Time Interval	1 min, 10 min, 15 min, 1 hour, 1 day, 1 month, 1 year (user-selectable, availability depends upon variable selected)
Graph Time Span	24 Intervals + Current Interval (see Graph Intervals to determine time span)
Graph Variable Span (Vertical Scale)	Automatic (values depending upon data range); Maximum and Minimum value in range appear in ticker
Alarm Indication	Alarms sound for only 2 minutes (time alarm is always 1 minute) if operating on battery power. Alarm message is displayed in ticker as long as threshold is not exceeded. Alarms can be silenced (but not cleared) by pressing the DONE key (all-alarms)
Transmission Interval	Varies with transmitter ID code from 2.25 seconds (#1-shortest), to 3 seconds (all-longest)
Update Interval	Varies with sensor - see individual sensor specs

Wireless Vantage Pro2™

Forecast

Variables Used	Barometric Reading & Trend, Wind Speed & Direction, Rainfall, Temperature, Humidity, Latitude & Longitude, Time of Year
Update Interval	1 hour
Display Format	Icons on top center of display, detailed message in ticker at bottom
Variables Predicted	Sky Condition, Precipitation, Temperature Changes, Wind Direction and Speed

Heat Index (calculated)

Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-40° to +165°F (-40° to +74°C)
Accuracy	±2°F (±1°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Source	United States National Weather Service (NWS/NOAA)
Formulation Used	Steadman (1979) modified by US NWS/NOAA and Davis Instruments to increase range of use
Variables Used	Instant Outside Temperature and Instant Outside Relative Humidity
Current Display Data	Instant Calculation
Current Graph Data	Instant Calculation, Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Calculations, Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Calculation

Humidity

Inside Relative Humidity (sensor located in console)	
Resolution and Units	1%
Range	1% to 100% RH
Accuracy	±3% from 1% to 90%; ±5% from 90% to 100%
Update Interval	1 minute
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant, Hourly Reading, Daily, Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings, Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Threshold from Instant Reading
Extra Outside Relative Humidity (sensor located inside Temperature/Humidity Station)	
Resolution and Units	1%
Range	1% to 100% RH
Accuracy	±2%
Drift	<0.25% per year
Update Interval	50 seconds to 1 minute
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant Reading (user adjustable)
Alarms	High and Low Threshold from Instant Reading

	5
	Wireless Vantage Pro2™
Leaf Wetness (requires leaf wetness sensor)	
Resolution	1
Range	0 to 15
Dry/Wet Threshold	User-selectable
Accuracy	±0.5
Update Interval	46 to 54 seconds
Current Graph Data	Instant Reading, Daily High and Low, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Readings, Daily Highs and Lows, Monthly Highs
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading
Moon Phase	
Console Resolution	1/8 (12.5%) of a lunar cycle, 1/4 (25%) of lighted face on console
WeatherLink Resolution	0.09% of a lunar cycle, 0.16% of lighted face maximum (depends on screen resolution)
Range	New Moon, Waxing Crescent, First Quarter, Waxing Gibbous, Full Moon, Waning Gibbous, Last Quarter, Waning Crescent
Accuracy	±38 minutes
Rainfall	
Resolution and Units	0.01" or 0.2 mm (user-selectable) (1 mm at totals ≥ 2000 mm)
Daily/Storm Rainfall Range	0 to 99.99" (0 to 999.9 mm)
Monthly/Yearly/Total Rainfall Range	0 to 199.99" (0 to 6553 mm)
Accuracy	For rain rates up to 4"/h (100 mm/hr): ±4% of total or ± one tip of the bucket (0.0170 mm), whichever is greater.
Update Interval	20 to 24 seconds
Storm Determination Method	0.02" (0.5 mm) begins a storm event, 24 hours without further accumulation ends a storm event
Current Display Data	Totals for Past 15 min
Current Graph Data	Totals for Past 15 min, Past 24 hour, Daily, Monthly, Yearly (start date user-selectable) and Storm (with begin date). Storms is displayed when 15-minute total exceeds zero
Historical Graph Data	Totals for 15-min, Daily, Monthly, Yearly (start date user-selectable) and Storm (with begin and end dates)
Alarms	High Threshold from Latest Flash Flood (15-min total, default is 0.50", 12.7 mm), 24-hour Total, Storm Total
Range for Rain Alarms	0 to 99.99" (0 to 999.7 mm)
Rain Rate	
Resolution and Units	0.01" or 0.1 mm (user-selectable) at typical rates (See Fig. 4 and 5)
Range	0 to 0.47"/h (1 mm/hr) to 96"/h (0 to 2438 mm/hr)
Accuracy	±5% for rates less than 5" per hour (127 mm/hr)
Update Interval	20 to 24 seconds
Calculation Method	Measures time between successive tips of tipping bucket. Elapsed time greater than 15 minutes or only one tip of the rain collector constitutes a rain rate of zero
Current Display Data	Instant
Current Graph Data	Instant and 1-min. Reading, Hourly, Daily, Monthly and Yearly High
Historical Graph Data	1-min Reading, Hourly, Daily, Monthly and Yearly High
Alarm	High Threshold from Instant Reading
Soil Moisture (requires soil moisture sensor)	
Resolution	1 db
Range	0 to 200 db
Update Interval	77 to 90 seconds
Current Graph Data	Instant Reading, Daily and Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings, Daily and Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

	7
	Wireless Vantage Pro2™
Temperature Humidity Sun Wind Index (requires solar radiation sensor)	
Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-40° to +165°F (-68° to +74°C)
Accuracy	±4°F (±2°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Sources and Formulation Used	United States National Weather Service (NWS)/NOAA Stepmann (1979) modified by US NWS/NOAA and Davis Instruments to increase range of use and allow for cold weather use
Variables Used	Instant Outside Temperature, Instant Outside Relative Humidity, 10-minute Average Wind Speed, 10-minute Average Solar Radiation
Formulation Description	Uses Heat Index as base temperature, affects of wind and solar radiation are either added or subtracted from the base to give an overall effective temperature
Current Graph Data	Instant and Hourly Calculation, Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Calculation, Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Reading
Ultra Violet (UV) Radiation Dose (requires UV sensor)	
Resolution and Units	0.1 MEDs to 19.9 MEDs, 1 MED above 19.9 MEDs
Range	0 to 199 MEDs
Accuracy	±5% of daily total
Drift	up to ±2% per year
Update Interval	30 seconds to 1 minute (5 minutes when dark)
Current Graph Data	Latest Daily Total (user resettable at any time from Current Screen)
Historical Graph Data	Hourly, Daily Totals (user reset from Current Screen does not affect these values)
Alarm	High Threshold from Daily Total
Alarm Range	0 to 19.9 MEDs
Ultra Violet (UV) Radiation Index (requires UV sensor)	
Resolution and Units	0.1 index
Range	0 to 16 Index
Accuracy	±5% of full scale (Reference: Yankee UVB-1 at UV index 10 (Extremely High))
Cosine Response	±4% FS (0° to 90° zenith angle)
Update Interval	30 seconds to 1 minute (5 minutes when dark)
Current Graph Data	Instant Reading and Hourly Average, Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Average, Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Calculation

	6
	Wireless Vantage Pro2™
Solar Radiation (requires solar radiation sensor)	
Resolution and Units	1 W/m ²
Range	0 to 1800 W/m ²
Accuracy	±5% of full scale (Reference: Eppley PSP at 1000 W/m ²)
Drift	up to ±2% per year
Cosine Response	±3% for angle of incidence from 0° to 75°
Temperature Coefficient	-0.007% per °F (-0.12% per °C), reference temperature = 77°F (25°C)
Update Interval	50 seconds to 1 minute (5 minutes when dark)
Current Graph Data	Instant Reading and Hourly Average, Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Average, Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Reading
Sunrise and Sunset	
Resolution	1 minute
Accuracy	±1 minute
Reference	United States Naval Observatory
Temperature	
Inside Temperature (sensor located in console)	
Resolution and Units	Current Data: 0.1°F or 1°F or 0.1°C or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C Historical Data and Alarms: 1°F or 1°C (user-selectable)
Range	-32° to +140°F (0° to +60°C)
Sensor Accuracy	±1°F (±0.5°C) (typical) See Fig. 2
Update Interval	1 minute
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant Reading, Daily and Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings, Daily and Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading
Outside Temperature (sensor located in ISS)	
Resolution and Units	Current Data: 0.1°F or 1°F or 0.1°C or 1°C (user-selectable) nominal °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C (Historical Data and Alarms: 1°F or 1°C user-selectable)
Range	-40° to +150°F (-40° to +65°C)
Sensor Accuracy	±0.5°F (±0.3°C) (typical) See Fig. 1
Radiation Induced Error (Passive Shield)	+4°F (2°C) at solar noon (insolation = 1040 W/m ² , avg. wind speed < 2 mph (1 m/s) (reference: RM Young Model 43408 Fan-Aspirated Radiation Shield))
Radiation Induced Error (Fan-Aspirated Shield)	+0.8°F (0.3°C) at solar noon (insolation = 1040 W/m ² , avg. wind speed < 2 mph (1 m/s)) (reference: RM Young Model 43408 Fan-Aspirated Radiation Shield)
Update Interval	10 to 12 seconds
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant Reading, Daily, Monthly, Yearly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings, Daily, Monthly, Yearly Highs and Lows
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading
Extra Temperature Probes	
Resolution and Units	Current Data: 1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C Historical Data and Alarms: 1°F or 1°C (user-selectable)
Range	-40° to +150°F (-40° to +65°C)
Sensor Accuracy	±1°F (±0.5°C) (typical) See Fig. 3
Update Interval	10 to 12 seconds (77 to 90 seconds for Leaf Wetness/Temperature and Soil Moisture/Temperature Stations)
Current Display Data	Instant Reading (user-adjustable offset available)
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

	8
	Wireless Vantage Pro2™
Wind	
Wind Chill (Calculated)	
Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-110° to +135°F (-79° to +57°C)
Accuracy	±2°F (±1°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Source	United States National Weather Service (NWS)/NOAA
Equation Used	Osczevnik (1969) (adopted by US NWS in 2001)
Variables Used	Instant Outside Temperature and 10-min. Avg. Wind Speed
Current Display Data	Instant Calculation
Current Graph Data	Instant Calculation, Hourly, Daily and Monthly Low
Historical Graph Data	Hourly, Daily and Monthly Low
Alarm	Low Threshold from Instant Calculation
Wind Direction	
Range	0 - 360°
Display Resolution	16 points (22.5°) on compass rose, 1° in numeric display
Accuracy	±3°
Update Interval	2.5 to 3 seconds
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant, 10-min. Dominant, Hourly, Daily, Monthly Dominant
Historical Graph Data	Past 6 10-min. Dominants on compass rose only, Hourly, Daily, Monthly Dominants
Wind Speed	
Resolution and Units	1 mph, 1 km/h, 0.4 m/s, or 1 knot (user-selectable). Measured in mph, other units are converted from mph and rounded to nearest 1 km/h, 0.1 m/s, or 1 knot.
Range	0 to 200 mph, 0 to 173 knots, 0 to 86 m/s, 0 to 322 km/h
Update Interval	Instant Reading, 2.5 to 3 seconds, 10-minute Average
Accuracy	±1 mph (1 km/h, 0.5 m/s) or ±5%, whichever is greater
Maximum Cable Length	240 feet (73 m) (See note on page 1)
Current Display Data	Instant
Current Graph Data	Instant, 10-minute and Hourly Average, Hourly High, Daily, Monthly and Yearly High with Direction of High
Historical Graph Data	10-min. and Hourly Averages, Hourly Highs, Daily, Monthly and Yearly Highs with Direction of Highs
Alarms	High Thresholds from Instant Reading and 10-minute Average

Wireless Communications	
Transmit/Receive Frequency	
US Models	902 - 928 MHz FHSS
EU Models	868 - 868.6 MHz FHSS
Japan Models	928.15 - 928.65 MHz FHSS
NZ Models	921 - 928 MHz FHSS
India Models	865.0 - 867.9 MHz FHSS
ID Codes Available	8
Output Power	
US Models	902 - 928 MHz FHSS: FCC-certified low power, less than 8 mW, no license required
EU Models	868 - 868.6 MHz FHSS: CE-certified, less than 8 mW, no license required
Japan Models	928.15 - 928.65 MHz FHSS, less than 1 mW, no license required
NZ Models	921 - 928 MHz FHSS, less than 10mW, no license required
India Models	865.0 - 867.9 MHz, less than 10mW, no license required
Range: All models except Japan	
Line of Sight	up to 1000 feet (300 m)
Through Walls	200 to 400 feet (60 to 120 m)
Range: Japan models	
Line of Sight	up to 300 feet (100 m)
Through Walls	50 to 200 feet (15 to 60m)
Sensor Inputs	
RF Filtering	RC low-pass filter on each signal line

Figura 71. Ficha técnica de la estación meteorológica utilizada en las pruebas experimentales.

Anexo D

Ficha técnica del módulo fotovoltaico SUNPOWER 410 W



Diseñados para el desempeño

- Las células más pequeñas permanecen más frías cuando están sombreadas, lo que prolonga la vida útil del panel⁴
- Un encapsulante patentado minimiza la degradación por la exposición ambiental
- El adhesivo conductor protege contra los cambios de temperatura diarios
- Las conexiones de células redundantes crean rutas flexibles para lograr un flujo continuo de la electricidad



sunpower.maxeon.com/es

PERFORMANCE 3 COM

RANGO DE POTENCIA: 420 - 405 W

El panel SunPower Performance 3 de tercera generación representa el último capítulo de una historia de innovación tecnológica, ofrece términos de garantía mejorados con una mayor área de células activas para aumentar la potencia y la eficiencia con respecto a los paneles de la generación anterior.

Respaldado por una garantía líder en el sector y una vida útil estimada de 35 años,¹ el panel SunPower Performance envuelve células de contacto frontal convencionales con 35 años de experiencia en materiales, ingeniería y fabricación para mitigar los desafíos de fiabilidad del diseño de paneles convencionales.

Durabilidad que se traduce en más energía

Diseñado para soportar tensiones ambientales como sombras, cambios diarios de temperatura y alta humedad, el panel SunPower Performance 3 brinda hasta un 8 % más de energía en el mismo espacio durante 25 años en comparación con los paneles de PERC monocristalino convencionales.²

Un historial de liderazgo en innovación

Diseñado para soportar tensiones ambientales como sombras, cambios diarios de temperatura y alta humedad, el panel SunPower Performance 3 brinda hasta un 8 % más de energía en el mismo espacio durante 25 años en comparación con los paneles de PERC monocristalino convencionales.³



Más de 3 GW
desplegados



Más de 60
países



Más de 90
patentes

Un mejor producto. Una mejor garantía.

Cada panel SunPower Performance se fabrica con la confianza necesaria para ofrecer más energía y fiabilidad a lo largo del tiempo, y está respaldado durante 25 años por la garantía de paneles de total confianza de SunPower:

- | | |
|---|-------|
| • Potencia mínima garantizada en el año 1 | 97.5% |
| • Degradación máxima anual | 0.50% |
| • Potencia mínima garantizada en el año | 85.5% |

PERFORMANCE 3 COM POTENCIA: 420 - 405 W

Datos eléctricos				
	SPR-P3-420-COM-1500	SPR-P3-415-COM-1500	SPR-P3-410-COM-1500	SPR-P3-405-COM-1500
Potencia nominal (P _{nom}) ¹	420 W	415 W	410 W	405 W
Tolerancia de potencia	+5/-0%	+5/-0%	+5/-0%	+5/-0%
Eficiencia de los paneles	20,4%	20,1%	19,9%	19,6%
Tensión nominal (V _{mpp})	45,3 V	45,0 V	44,5 V	44,0 V
Intensidad nominal (I _{mpp})	9,28 A	9,22 A	9,21 A	9,20 A
Tensión de circuito abierto (V _{oc})	54,4 V	54,1 V	53,9 V	53,3 V
Intensidad de cortocircuito (I _{sc})	9,92 A	9,90 A	9,89 A	9,88 A
Máx. tensión del sistema				1500 V IEC
Fusible de serie máxima				18 A
Coef. potencia-temperatura				-0,34% / °C
Coef. tensión-temperatura				-0,28% / °C
Coef. intensidad-temperatura				0,06% / °C

Pruebas y certificaciones	
Pruebas estándar ^a	IEC 61215, IEC 61730, nominal a 1500 V
Certificados de gestión de calidad	ISO 9001:2008, ISO 14001:2004
Conformidad con EHS	OHSAS 18001:2007, plan de reciclaje
Prueba de amoníaco	IEC 62716
Prueba de soplado de arena	MIL-STD-810G
Prueba de niebla salina	IEC 61701 (máxima severidad)
LeTID Prueba ⁷	IEC 61215 (MQT 23.1 LeTID detection) proyecto de norma
Prueba PID	IEC 62804
Normas disponibles	TUV

Condiciones de funcionamiento y datos mecánicos	
Temperatura	-40°C a +85°C
Resistencia a impactos	Granizo de 25 mm de diámetro a 23 m/s
Células solares	PERC monocristalino
Cristal templado	Templado antirreflectante de alta transmisión
Caja de conexión	IP-67, Staubli MC4-Evo2, 3 diodos de derivación
Peso	22 kg
Máx. carga	Viento: 2400 Pa, 245 kg/m ² en cara frontal y posterior Nieve: 5400 Pa, 550 kg/m ² en cara frontal
Bastidor	Anodizado plata de clase 2

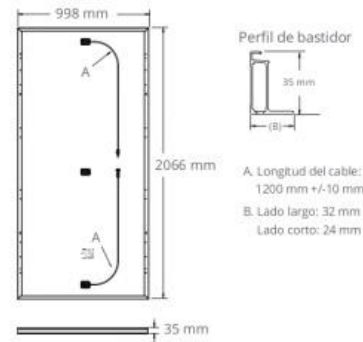
- 1 Vida útil prevista de los paneles Performance de 35 años. Fuente: "SunPower P-Series Technology Technical Review" (Reseña técnica sobre la tecnología de serie P de SunPower), Informe de ingenieros independientes de Leidos, 2016.
- 2 El panel SunPower 420 W tiene el 20,4 % de eficiencia en comparación con un panel convencional en matrices del mismo tamaño (PERC monocristalino de 370 W, 19 % de eficiencia, aprox. 1,94 m²) y una tasa de degradación menor, de 0,25 % por año (Jordan, et. al. Metodología y aplicación sobre la degradación de células fotovoltaicas robustas, PVSC 2018).
- 3 Osborne, "SunPower supplying P-Series modules to a 125MW NextEra project" (SunPower suministra módulos de la serie P a un proyecto NextEra de 125 MW) PV-Tech.org, Marzo de 2017.
- 4 SunPower Performance Series – Thermal Performance, Z. Campeau 2016.
- 5 Medido en condiciones de prueba estándar (STC): irradiancia de 1000 W/m², AM 1,5 y temperatura de células de 25 °C.
- 6 Calificación antincendios de clase C según IEC 61730.
- 7 Sensibilidad LID de Fraunhofer CSP de acuerdo con IEC 61215 (detección LeTID MQT 23.1).

Diseñado en Estados Unidos por SunPower Corporation
Ensamblado en China

Las especificaciones incluidas en esta ficha técnica están sujetas a cambios sin previo aviso.

© 2020 Maxeon Solar Technologies. Todos los derechos reservados.
Consulte la información sobre la garantía, patentes y marcas comerciales en maxeon.com/legal.

sunpower.maxeon.com/es



Lea la guía de instalación y seguridad.

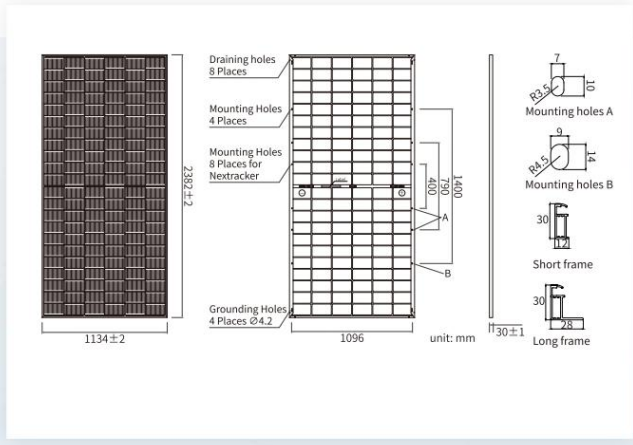
SUNPOWER
FROM MAXEON SOLAR TECHNOLOGIES

535836 REV A / A4_ES
Fecha de publicación: Septiembre 2020

Figura 72. Ficha técnica del módulo fotovoltaico instalado en el sitio de estudio.

Anexo E

Ficha técnica del módulo fotovoltaico JA Solar 630 W



MECHANICAL PARAMETERS

Cell	Mono
Weight	33.1kg
Dimensions	2382±2mm×1134±2mm×30±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC), 12 AWG(UL)
No. of cells	132(6×22)
Junction Box	IP68, 3diodes
Connector	QC 4.10-35I/ MC4-EVO2A
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-) Landscape: 1500mm(+)/1500mm(-)
Front Glass/Back Glass	2.0mm/2.0mm
Packaging Configuration	36pcs/Pallet, 720pcs/40HQ Container

Remark: customized frame color and cable length available upon request

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM66D45	JAM66D45	JAM66D45	JAM66D45	JAM66D45	JAM66D45
	-605/LB	-610/LB	-615/LB	-620/LB	-625/LB	-630/LB
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	605	610	615	620	625	630
Open Circuit Voltage (Voc) [V]	47.90	48.10	48.30	48.50	48.70	48.90
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	39.60	39.77	39.96	40.21	40.45	40.70
Short Circuit Current(Isc) [A]	16.00	16.05	16.10	16.13	16.15	16.18
Maximum Power Current(Imp) [A]	15.28	15.34	15.39	15.42	15.45	15.48
Module Efficiency [%]	22.4	22.6	22.8	23.0	23.1	23.3
Power Tolerance	0~+3%					
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of Voc (β _{Voc})	-0.250%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0.290%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

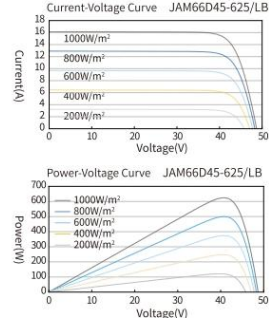
Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS WITH 10% SOLAR IRRADIATION RATIO

TYPE	JAM66D45	JAM66D45	JAM66D45	JAM66D45	JAM66D45	JAM66D45
	-605/LB	-610/LB	-615/LB	-620/LB	-625/LB	-630/LB
Rated Max Power(Pmax) [W]	653	659	664	670	675	680
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	47.90	48.10	48.30	48.50	48.70	48.90
Max Power Voltage(Vmp) [V]	39.60	39.77	39.96	40.21	40.45	40.70
Short Circuit Current(Isc) [A]	17.28	17.33	17.39	17.42	17.44	17.47
Max Power Current(Imp) [A]	16.50	16.56	16.62	16.65	16.69	16.72
Irradiation Ratio (rear/front)	10%					

* For Nextracker installations, maximum static load please take compatibility approve letter between JA Solar and Nextracker for reference.

CHARACTERISTICS



OPERATING CONDITIONS

Maximum System Voltage	1500V DC
Operating Temperature	-40°C~+85°C
Maximum Series Fuse Rating	35A
Maximum Static Load, Front*	5400Pa(112 lb/ft ²)
Maximum Static Load, Back*	2400Pa(50 lb/ft ²)
NOCT	45±2°C
Bifaciality	80%±5%
Safety Class	Class II
Fire Performance	UL Type 29/Class C



Headquarters No. 8 Building, Nuode Center, No.1 Courtyard, East Auto Museum Road, Fengtai District, Beijing
Tel: +86 10 6361 1888 Fax: +86 10 6361 1999
E-mail: sales@jasolar.com marketing@jasolar.com www.jasolar.com

Specifications subject to technical changes and tests. JA Solar reserves the right of final interpretation.
Version No.: Global-EN-20250417A

Figura 73. Ficha técnica del módulo fotovoltaico del arreglo del ejido Laguna Salada.

Anexo F

Ficha técnica de los equipos que se tomaron en cuenta para el dimensionamiento y evaluación económica de la microrred.

Sol-Ark 60K-480V

DATASHEET

60K-480V

C&I Hybrid Inverter

Inverter Model Name:	60K-3P-480V
Sol-Ark Product SKU:	60K-3P-480V
Input Data (PV)	
Max. Allowed PV Power (STC)	78,000W
MPPT Voltage Range	150-850V
Startup Voltage	180V
Max. Input Voltage ¹	1,000V
Max. operating input current per MPPT	36A
Max. short circuit current per MPPT	55A
No. of MPP Trackers	4
No. of PV Strings per MPPT	2
Max. AC Coupled Input	60,000W
Output Data (AC)	
Nominal AC Voltage (3Φ)	277/480V
Grid Frequency	50 / 60Hz
Real Power, max continuous (3Φ)	60,000W
Max. Output Current	72.3A
Peak Apparent Power (10s, off-grid, 3Φ)	90,000VA
Max. Grid Passthrough Current (10min)	200A
Continuous Grid Passthrough Current	180A
Power Factor Output Range	+/- 0.8 adjustable
Backup Transfer Time	5ms (adjustable)
CEC Efficiency	96.5%
Max Efficiency	97.5%
Design (DC to AC)	Transformerless DC
Stackable	Up to 10 in parallel
Battery Input Data (DC)	
Battery Chemistry	Lithium iron phosphate
No. of Battery Inputs	2
Battery Input Terminal Rating	50A
Nominal DC Voltage	≥ 600V
Operating Voltage Range	160 - 800V
Battery Capacity Range	50 - 9900Ah
Max. Battery Charge / Discharge Current	100A (50A per input)
Charge Controller Type	3-Stage with Equalization
Grid to Battery Charging Efficiency	96.0%
Automatic Generator Start (AGS)	2 Wire Start - Integrated
BMS Communication ²	CANBus & RS485
General Data	
Dimensions (H x W x D)	894 x 528 x 295 mm (35.2 x 20.8 x 11.6 in)
Weight	80 Kg / 176 lb.
Enclosure	IP65 / NEMA 3R
Ambient Temperature	-40 - 60°C, >45°C Derating
Noise	< 30 dB @ 25°C (77°F)
Idle Consumption - No Load	60W
Communication and Monitoring	Wi-Fi & LAN Hardware Included
Warranty ³	10 Years (15 Years)
Category	
Certifications and Listings (Grid Support Interactive Inverter)	UL 1741-2021 (UL1741SB), CSA C22.2 No 107.1-16, IEEE 1547-2018 & 1547a-2020 & 1547.1-2020 (SRD V2.0), UL 1741 CRD-PCS, UL1699B, CEC, SGIP ⁴
PV DC Disconnect Switch - NEC 240.15	Integrated
Ground Fault Detection - NEC 690.5	Integrated
PV Rapid Shutdown Control - NEC 690.12	Integrated
PV Arc Fault Detection - NEC 690.11	Integrated
PV Input Lightning Protection	Integrated
PV String Input Reverse Polarity Protection	Integrated
Surge Protection	DC Type II / AC Type III

1. See Installation Guide for more details on sizing array strings. The highest input voltage is based on the open-circuit voltage of the array at the minimum design temperature.
 2. Active BMS communication is required for all lithium batteries. A list of compatible batteries can be found on our website.
 3. 5-year extension is available for purchase by registered Gold level installers only.
 4. Pending listing.

Figura 74. Ficha técnica del inversor de referencia para el dimensionamiento de la microrred.

BOS-GM5.1-D

Technical Data

Model		BOS-G60H
Main Parameter		
Cell Chemistry	LiFePO4	
Module Energy (kWh)	5.12	
Module Nominal Voltage (V)	51.2	
Module Capacity (Ah)	100	
Battery Module Qty In Series (Optional)	12	
System Nominal Voltage (V)	614.4	
System Operating Voltage (V)	480~700.8	
System Energy (kWh)	61.44	
System Usable Energy (kWh) ¹	55.29	
Charge/Discharge ² Current (A)	Recommend	50
	Nominal	100
	Peak Discharge (2 mins, 25°C)	125
Working Temperature (°C)	Charge: 0~55/Discharge: -20~55	
Status Indicator	Yellow: Battery High Voltage Power On Red: Battery System Alarm	
Communication Port	CAN2.0/ RS485	
Humidity	5%~85%RH	
Altitude	≤2000m	
IP Rating of Enclosure	IP20	
Dimension (W/D/H,mm)	589*590*2240	
Weight Approximate (kg)	596	
Installation Location	Rack Mounting	
Storage Temperature (°C)	0~35	
Recommend Depth of Discharge	90%	
Cycle Life	25±2°C,0.5C/0.5C, EOL70%≥6000	
Warranty ³	10 years	
Certification	UL1973 /UL9540A/UN38.3	

1. DC Usable Energy, test conditions: 90% DOD, 0.3C charge & discharge at 25°C. System usable energy may vary due to system configuration parameters.
2. The current is affected by temperature and SOC.
3. The warranty is due whichever reached first of warranty period or life cycle power.

System Components




Model	Description	
BOS-G-PDU-NA	High Voltage Battery cluster control box conforming to North American Standard	
Operating Voltage	120~750Vdc	
Nominal Charge/Discharge Current	100A	
Max.Charge/Discharge Current	125A	
DC Input Rating	12±2%V/4.15A	
Operating Temperature Range	-20~65°C	
Ingress Protection	IP20	
Dimension (W/D/H)	440*570*150mm	
Weight Approximate	17kg	
BOS-GM5.1-D	5.12 kwh battery module	
Battery Type	LiFePO4(LFP)	
Nominal Voltage	51.2Vdc	
Rated Capacity	100Ah	
Rated Energy	5.12kWh	
Nominal Charge/Discharge Current	100A	
Peak Discharge Current	125A	
Charge Temperature	0~55°C	
Discharge Temperature	-20°C~55°C	
Storage Temperature	0°C~35°C	
Ingress Protection	IP20	
Dimension (W/D/H)	440*570*133mm	
Weight Approximate	44kg	
3U-HCabinet(Optional)	Standard 19inch rack can install 12 pcs batteries and 1 pcs High Voltage Battery cluster control box	
Dimension (W/D/H)	530*660*2286mm	
Weight Approximate	80kg	

Figura 75. Ficha técnica de las baterías de referencia para el dimensionamiento de la microrred.

Anexo G

Manuscrito científico derivado de los estudios de maestría.

El siguiente manuscrito corresponde a un trabajo realizado durante el desarrollo de la maestría, pero no forma parte directa del tema central de la tesis. Las referencias incluidas pertenecen al propio manuscrito y no se integran a la lista general de referencias de la tesis, conservándose su formato original.

Potential of Agrivoltaics in Mexico: Opportunities and Challenges for Energy and Agricultural Sustainability

Authors: N. A. Pérez de Alva, S. Islas-Pereda*, N. Velázquez-Limón, J. A. Aguilar-Jiménez, etc.

Institution: Centro de Estudios de las Energías Renovables, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. B. Juárez s/n, 21280, Mexicali, BC, México.

Abstract:

Agrivoltaics enables the co-production of electricity through solar energy and agricultural products on the same land. In Mexico, a country with vast agricultural lands and high solar potential, this practice represents a strategic opportunity to diversify the energy matrix and enhance agricultural sustainability. This study presents the first systematic analysis of the agrivoltaic potential in Mexico for electricity generation, considering factors such as the agrivoltaic density of previously studied crops, the cultivated area of each crop, and the average solar irradiance, while also identifying key implementation challenges. The results indicate that maize has the highest theoretical electricity generation potential (9,219.89 TWh yr⁻¹), followed by wheat (809.12 TWh yr⁻¹) and green chili (435 TWh yr⁻¹). Additionally, crops such as raspberries, tomatoes, and strawberries exhibit high theoretical potential per hectare, producing between 2.04 and 2.73 GWh yr⁻¹ ha⁻¹, underscoring their technical feasibility for agrivoltaic systems. Crops were further classified by agrivoltaic density and crop rotation compatibility. Implementing these systems on just 1% of the agricultural land in Mexico could supply up to 14.79% of the national electricity

consumption and prevent the emission of 22.38 million tons of CO₂ per year. Despite this vast potential, agrivoltaics in Mexico faces challenges such as infrastructure adaptation, the lack of rural grid connectivity, and sociocultural resistance. With appropriate strategies, Mexico could lead the transition toward a more sustainable energy system, strengthen rural development, and establish itself as a global reference in agrivoltaics.

1. Introduction

Agrivoltaics involves the simultaneous integration of photovoltaic energy generation and agricultural production within the same space [1]. This concept has its roots in agroforestry, a practice that strategically incorporates trees into agricultural or livestock land [2]. Agroforestry research has examined environmental interactions within the microclimates created by these systems [3], demonstrating improvements of up to 38% in crop productivity due to the shading effects of trees [4][5]. German physicists Adolf Goetzberger and Armin Zastrow are considered pioneers of agrivoltaics, as they introduced in 1981 the idea that would change the way agriculture was practiced: combining solar energy production with agriculture by proposing a photovoltaic array installed two meters above cultivated land [6]. Following this proposal, numerous studies emerged, mainly in Japan, under the name “Solar Sharing” [7]. However, it was not until 2011 that C. Dupraz et al. introduced the term “agrivoltaics” [8]. Since then, the concept has gained increasing international recognition, giving rise to numerous experiments and scientific investigations. Several studies have assessed the potential of agrivoltaic systems in specific regions, highlighting both advantages and limitations in addressing climatic and energy challenges. Each study tailors its analysis to the particular context of its country, such as deforestation in Brazil [9], land-use competition in Turkey [10], [11], and economic challenges in the United States [12]. Additionally, these studies review practical cases and pilot projects, offering recommendations to overcome barriers and promote the adoption of agrivoltaic systems.

Building on these studies, agrivoltaics has been recognized as a promising strategy for optimizing land use, enhancing climate resilience, diversifying the energy matrix, fostering rural development, creating employment opportunities, and reducing greenhouse gas emissions. By contextualizing the current state of agrivoltaic technology worldwide, it is

possible to identify international practices that can be implemented in other countries, considering the climatic, agricultural, and socioeconomic characteristics of each region. Such contextualization is essential to promote the sustainable and efficient development of agrivoltaics. The existing body of literature covers a wide range of approaches, including land-use optimization, system configuration, microclimates and crop yield impacts, water resource management, non-conventional photovoltaic technologies, solar tracking systems, photovoltaic efficiency, and economic performance metrics. Table 1 synthesizes agrivoltaic studies classified by approach, study location, analyzed crops, and key findings.

Within this broader evidence base, electricity–yield trade-offs are apparent across distinct studies and context: In spring wheat, losses of 33%–46% at ~50% shade co-occur with 617 MWh ha⁻¹ yr⁻¹; sugar beet shows 11%–19% losses with 376–560 MWh ha⁻¹ reported over two seasons [13] and maize exhibits 4.9% higher biomass and 5.6% higher grain yield under low-density arrays, with 594.8 MWh ha⁻¹ yr⁻¹ [14]. Overall land use remains favorable, with LER > 1.0 across reports (olive up to 1.71; all simulated maize scenarios >1) [15][16]. Mechanistically, C4 crops such as maize maintain photosynthesis under moderate shade, whereas C3 cereals become light-limited near ~50% of full-sun PAR (photosynthetically active radiation) [13][16]. In practice, mobile photovoltaic systems that modulate shading across the day can preserve yield while producing electricity [17]. Panel shade can reduce irrigation by ≈20% in lettuce [18] and boost water-use efficiency by 328% in semi-arid grasslands [19]. With 50% less irrigation, tomatoes maintained daily carbon gain and yield [20].

Quality and yield components shift bidirectionally under shaded conditions: higher bean mass in coffee [21] but reduced thousand-kernel weight in cereals under excessive shade [22]. Disease and pest pressures co-vary with design: denser arrays raise night-time humidity, favoring downy mildew in cucurbits and *Botrytis* in strawberries [23][24], while reduced UV can lower aphid (*Myzus persicae*) colonization [25]. These risks can be mitigated through ≥2 m clearance, east–west orientation, or single-axis tracking, which restores ventilation and brief full-sun exposure [26].

Despite rapid progress, research output remains geographically unbalanced. While most major advancements in agrivoltaics are concentrated in Europe and East Asia, scientific publications in the Western Hemisphere remain limited. This suggests a considerable

development gap in regions with climatic, agricultural, and socioeconomic conditions distinct from those of countries leading current research efforts. Although these regions may face challenges that agrivoltaics could address, the lack of context-specific studies limits the identification and application of suitable solutions.

Mexico, with its vast land territory and status as the eleventh-largest agricultural producer worldwide [27], stands out for its climatic diversity and agricultural richness, making it a highly suitable context for agrivoltaic implementation. Nevertheless, no studies have yet evaluated the agrivoltaic potential of the country. This paper presents the first systematic assessment to determine the agrivoltaic potential of Mexico by analyzing variables such as the agrivoltaic density in previously studied crops, the cultivated area of each crop, average solar irradiance, and proposed photovoltaic efficiency. This study aims to establish a scientific reference for advancing a sustainable energy and agricultural transition in Mexico, while identifying the main opportunities and barriers to its implementation.

Table 1. Agrivoltaic studies classified according to their approach.

	Author	Location	Crop	Finding
Land-use optimization	C. Dupraz et al.	Montpellier, France.	-	Overall soil productivity increased by 35-73%.
	E. Mouhib et al.	Jaen, Spain.	Olive.	LER of 1.71 with modules inclined at 20°.
	M. Varo-Martínez et al.	Cordoba, Spain.	-	Up to 74% of the land is cultivable with 1.4 m high crops.
	S. Amaducci et al.	Po Valley, Italy.	Maize.	LER >1 in all simulated scenarios.
	M. Trommsdorff et al.	Konstanz, Germany.	Potato, celery, clover grass and wheat.	Land use efficiency increased by 56-70%.
	C Rösch, E. Fakharizadehshirazi	Karlsruhe, Germany	Legumes, carrot, and onion.	APV could achieve 88% of PV target set by Germany for 2030. ≈11% of permanent agricultural land under 2.5 ha is suitable.
System layout	A. Sarr et al.	Ouagadougou, Burkina Faso	-	Radiation is influenced by module height and spacing.
	S. Amaducci et al.	Po Valley, Italy.	-	Module density affects radiation more than management.
	P. E. Campana et al.	Västerås, Sweden	Potato and oats.	Distance between modules affects radiation distribution.

Microclimate	O. H. Kwon et al.	Incheon, South Korea.	-	Greater distance between modules reduces shading.
	Y. Elamri et al.	Montpellier, France.	Lettuce.	Higher summer production with medium density.
	Z. Tahir, N. Zafar Butt	Lahore, Pakistan.	-	Vertical modules provide greater incident radiation and uniformity.
	A. Perna et al.	Fresno and South Plains, USA.	-	Fixed systems perform worse than tracking; chess layout reduces irradiance losses by 6%
	E. Mengi et al.	Davis, USA.	Tomato.	28.9% increase in combined production with 18% reduction in agricultural output.
	V. Prakash et al.	Amrol, India.	Wheat.	Higher module density reduces agricultural production.
	T. Reher et al.	Leuven, Belgium.	Sugar beet and wheat.	Yield reduction: beet 11%–19%, wheat 33%–46%.
	H. Jo et al.	Kyungpook, South Korea.	Rice, rye and maize.	Rye and maize maintained yield; rice decreased.
	S. Amaducci et al.	Po Valley, Italy.	Maize.	Average performance was higher and more stable.
	S. H. Chae et al.	Naju, South Korea.	Broccoli.	Greener broccoli without yield changes.
	G.A. Barron-Gafford et al.	Arizona, USA.	Chiltepin chili, jalapeño and cherry tomato.	Chiltepin chili yield three times higher, jalapeño similar, cherry tomato two times higher.
	T. Sekiyama, A. Nagashima	Ichihara, Japan.	Maize.	Low-density increased 4.9% and 5.6% production.
	R. A. Gonocruz et al.	Nishitokyo, Japan.	Rice.	Upper limit of allowed shade rate is 27%–39%.
	B. Valle et al.	Montpellier, France.	Lettuce.	Transient shade conditions increased leaf area.
A. Carreño-Ortega et al.	Almeria, Spain.	Lettuce.	Low light crops are compatible with module shading.	
M. I. Hermelink et al.	Wageningen, Netherlands.	Strawberry, blueberry, blackberry, and black currant.	Some berries are less suited to shaded agrivoltaics.	
G. N. Nguyen et al.	Carnarvon, Australia.	Eggplant.	Eggplant grows and yields higher under shade.	
T. Setyorini et al.	Yogyakarta, Indonesia.	Mustard greens and eggplant.	Both suitable for agrivoltaics. Eggplant is affected by its location.	

	A. A. Reeza et al.	Melaka, Malaysia.	Eggplant, okra, spinach, cabbage, and kale.	Okra and eggplant grew more slowly under modules; spinach and cabbage preferred space between modules.
	G.A. Barron-Gafford et al.	Arizona, USA.	Tomato.	With 50% irrigation cut, yield was unchanged and mitigated midday photosynthesis depression.
Water usage	Y. Elamri et al.	Montpellier, France.	Lettuce.	Irrigation reduced 20% with 10% yield loss.
	I. A. Ramos-Fuentes et al.	Montpellier, France.	Maize.	Irrigation was reduced 19%–47% due to shading.
	E. Hassanpour et al.	Corvallis, USA.	Grass.	Soil moisture was maintained with 328% better water use efficiency.
	S. Jiang et al.	Chengdu, China.	Kiwi.	Water use increased 8.2% in low-density.
	H. Marrou et al.	Montpellier, France.	Cucumber and lettuce.	Evapotranspiration reduced by 10%–30% with 50%–70% light.
	C. Wu et al.	Wuwei, China.	-	Soil moisture increased 59%–113.6% from shading.
Non-conventional PV systems	M. Zotti et al.	Portici, Italy.	Lettuce and seaweed.	Thin film technology increases performance and protects from high radiation.
	N. Gnayem et al.	Kafr Qara, Israel.	Cucumber.	Silicon encapsulated in glass improves crop yield and quality.
	F. Johansson et al.	Västerås, Sweden.	-	Vertical bifacial modules increase energy efficiency.
	O. A. Katsikogiannis et al.	Delft, Netherlands.	-	East-West vertical is optimal for permanent crops; North-South for shade-tolerant crops.
	H. Imran, M. H. Riaz	Lahore, Pakistan.	-	Bifacial modules outperform conventional semitransparent.
Solar tracking	E. K. Grubbs et al.	West Lafayette, USA.	Maize.	Backtracking reduces energy generation but improves soil productivity.
	D. Panico et al.	Davis, EE.UU.	-	Backtracking increases solar energy capture.
	F.J. Casares de la Torre et al.	Cordoba, Spain.	-	Backtracking prevents shading of crops on modules.
	D. Wang, Y. Sun	Shanghai, China.	-	Tracking algorithm controls shading and maximizes generation.
	B. Valle et al.	Montpellier, France.	Lettuce.	Tracking increases energy and biomass.
	B. Willockx et al.	Grembergen, Belgium.	Sugar beet.	Smart tracking increased energy production by 30% and biomass by 20%.

PV system efficiency	N. F. Othman et al.	Seri Kembangan, Malaysia.	Misai Kucing	DC production increased 3%.
	J. W. C. Teng et al.	Dove Dr, Singapore.	Lettuce.	0.7–2.83°C decrease in module temperature; 1.13%–3.2% increase in power generation.
	G.A. Barron-Gafford et al.	Arizona, USA.	Chiltepín chile, jalapeño and cherry tomato.	8.9°C reduction in module temperature; 3% increase in power.
	H. J. Williams et al.	Sarnia, Canada.	Soybeans.	Module temperature reduction up to 10°C.
Economic indicators	S. Schindele et al.	Germany.	Potato and wheat	APV LCOE 38% higher than PV; OPEX lower.
	S. Parkinson, J. Hunt	Regions with water stress at a global level.	Wheat, rice, maize, sugar cane, fruit, vegetables, cotton, fodder, legumes.	Suitable for areas with groundwater depletion.
	A. Agostini et al.	Po Valley, Italy.	Maize.	LCOE comparable to ground-mounted or rooftop.
	A. Feuerbacher et al.	Germany.	Wheat, maize, potato, beet.	10% of the most profitable farms could meet 8.8% of electricity demand using 1% of arable land.
	M. Sojib Ahmed et al.	Vietnam, Bangladesh, China, Egypt, Brazil, India.	Rice.	Benefits 22-115 times greater than just rice alone.
	B. M. Grau	Sweden.	Cherry.	No immediate economic viability unless subsidies or major cost reductions.
	G. Di Francia, P. Cupo	Italy.	Wheat, maize, soybeans, potatoes and sunflowers.	Infrastructure costs hinder installation without subsidies or cost reduction.
	M. Trommsdorff et al.	West Germany.	Apple.	Investment costs reduced by 26%; operating costs reduced 9%; revenue reduced 9%; total production cost 5%.
	A. Ravilla et al.	Sioux Falls, USA.	Lettuce.	APV LCOE 15-55% lower environmental impact than photovoltaic; incentives needed to compete with farms.
	P. E. Campana et al.	Västerås, Sweden.	Legumes and grass.	30 times more profitable than conventional rotation form NPV perspective.

2. Energy and agricultural context of Mexico.

2.1 Agriculture in Mexico.

In 2023, Mexico ranked as the 11th largest agricultural crop producer worldwide. During that year, the country had 23.4 million hectares designated for agricultural use, of which 20 million were actively cultivated. The main exports of the country were directed to the United States, Japan, and Canada [74].

The Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Ministry of Agriculture and Rural Development, SADER) has divided Mexico into agri-food regions to facilitate the identification of the productive capacities of each one. This regional division aims to optimize resource use, including land, water, and labor for food and agricultural production across five regions: Central (Guerrero, Hidalgo, Mexico City, Morelos, Puebla, State of Mexico and Tlaxcala),

Central-West (Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí and Querétaro), Northwest (Baja California, Baja California Sur, Nayarit, Sinaloa and Sonora), Northeast (Chihuahua, Tamaulipas, Coahuila, Durango, Zacatecas and Nuevo León) and South-Southeast (Campeche, Oaxaca, Chiapas, Tabasco, Quintana Roo, Yucatán and Veracruz) [75]. Some of the key crops for which Mexico is internationally recognized are presented in Table 2.

Table 2. Main crops of Mexico.

Crop	Main producing states	Production (tons)	Total production (tons)	Agri-food region	World ranking
Avocado	Michoacán	2,525,783	2,973,344	Central-West	1
	Jalisco	323,228		Central-West	
	México	132,478		Central	
Blackberry	Michoacán	214,706	238,122	Central-West	1
	Jalisco	16,159		Central-West	
	Baja California	2,573		Northwest	
Raspberry	Jalisco	122,022	190,412	Central-West	2
	Baja California	32,250		Northwest	
	Michoacán	30,354		Central-West	
Lemon	Michoacán	953,652	3,239,915	Central-West	2
	Veracruz	867,916		South-Southeast	

	Colima	312,047		Central-West	
Green chili	Chihuahua	836,620	3,681,061	Northeast	2
	Sinaloa	813,081		Northwest	
	Zacatecas	497,772		Northeast	
Asparagus	Sonora	200,820	347,291	Northwest	3
	Guanajuato	44,907		Central-West	
	Baja California Sur	43,983		Northwest	
Cucumber	Sinaloa	262,530	1,036,717	Northwest	4
	Sonora	198,103		Northwest	
	Michoacán	98,923		Central-West	
Cauliflower	Guanajuato	30,133	105,406	Central-West	4
	Puebla	19,779		Central	
	Hidalgo	16,761		Central	
Broccoli	Guanajuato	432,217	662,948	Central-West	4
	Puebla	50,784		Central	
	Michoacán	39,413		Central-West	
Strawberry	Michoacán	401,800	641,552	Central-West	5
	Guanajuato	100,971		Central-West	
	Baja California	100,066		Northwest	
Maize grain	Sinaloa	6,656,331	27,549,918	Northwest	6
	Jalisco	3,498,653		Central-West	
	Michoacán	1,905,198		Central-West	

2.2 Electricity sector in Mexico.

The electricity sector in Mexico is federally owned and entirely managed by the Comisión Federal de Electricidad (Federal Electricity Commission, CFE) [76]. CFE is a public company established in 1937 [77] that operates as a state-owned entity, belonging exclusively to the federal government [78].

In 2022, electricity production increased by 5.47%, rising from 7,081.42 PJ in 2021 to 7,468.99 PJ in 2022. Hydrocarbons accounted for 80.71% of national production, with

crude oil as the primary component of the primary energy matrix, representing 50.98%. Natural gas was the second most significant energy source, accounting for 22.20% of total primary energy production with 1,657.94 PJ. Renewable energies ranked third, contributing 15.40% of the total and growing by 10.28%. Within the energy matrix, biomass accounted for 4.78%, hydroelectric power 4.22%, geothermal energy 1.31%, solar energy 2.63%, wind energy 2.42%, and biogas 0.03% [79].

2.3 Photovoltaic energy in Mexico.

Mexico has outstanding solar energy potential, with nearly 90% of the national territory receiving average solar irradiation levels ranging between 5 and 6 kWh m⁻² per day [80]. These conditions make the country highly suitable for the deployment of photovoltaic systems.

The Centro Nacional de Control de Energía (National Energy Control Center, CENACE), in its 2023-2037 PRODESEN (National Electric System Development Program), listed the main photovoltaic power plants in Mexico [81], which are distributed across nine states: Aguascalientes, Campeche, Baja California, Coahuila, Chihuahua, Jalisco, Guanajuato, Tlaxcala and Sonora.

In Figure 1 (adapted and modified from the data reported by the Solar Resource Map © 2021 Solargis [82]), illustrates both the photovoltaic electricity generation and the location of the main photovoltaic plants operating in Mexico as of 2022. (See Table 3 for detailed information.)

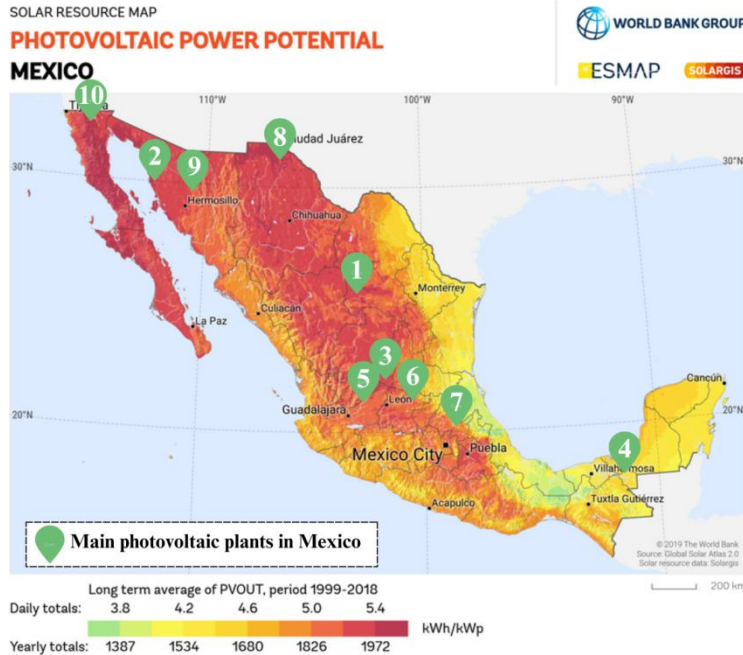


Figure 1. Photovoltaic electricity potential and location of main photovoltaic plants in Mexico.

Table 3. Main photovoltaic plants in Mexico.

No.	Name	Location	Capacity (MW)	Annual production (GWh)	Land (ha)	Grid-connected since
1	Parque Solar Villanueva	Viesca, Coahuila	754	1700	2400	2018
2	Puerto Libertad Fotovoltaica	Puerto Libertad, Sonora	317	963	1019	2019
3	Pachamama	Los Aguilares, Aguascalientes	300	912.5	829	2019
4	La Pimienta	San Paulino, Campeche	300	750.04	651	2022
5	Potreros Solar	Lagos de Moreno, Jalisco	296	728.72	640	2020
6	Parque Solar Don Jose	La Soledad del Monte, Guanajuato	238	625	1300	2018
7	Magdalena II	San Antonio Techalote, Tlaxcala	220	600	443	2019

8	Border Solar Norte	Juarez, Chihuahua	157.25	456.5	494.93	2021
9	Don Diego Solar	Benjamin Hill, Sonora	125	369.1	499	2019
10	Parque Solar La Rumorosa	La Rumorosa, Baja California	41	123	135.63	2019

In 2023, the interconnected photovoltaic installed capacity of the CFE and other permit holders reached 7,469 MW, resulting in a total generation of 18,147 GWh [83].

The Secretaría de Energía (Ministry of Energy, SENER), in its clean energy progress report for PRODESEN, highlighted an increase in photovoltaic electricity generation, which rose from 16,278 GWh in 2022 to 18,147 GWh in 2023 [79]. At the 2022 United Nations Climate Change Conference (COP 27), Mexico announced an ambitious goal of adding 40 GW of renewable capacity to its energy matrix by 2030 [84]. In 2023, the country reached an installed capacity of 28.51 GW, representing a 3.4% increase from the 27.45 GW recorded in 2022. However, to achieve this target, Mexico will need to install an additional 38.94 GW over the next seven years, which is a 40% increase over its current capacity.

The expansion of photovoltaic solar energy offers multiple benefits, including reduced electricity costs in the Wholesale Electricity Market, increased industrial and agricultural activity, positive impacts on Gross Domestic Product (GDP), job creation, and significant reductions in greenhouse gas emissions [85].

The Energy Transition Law outlines a national strategy for developing an energy sector based on clean and efficient technologies, aimed at promoting productivity, sustainable development, and social equity. According to the "Vision 2050" initiative, Mexico seeks to achieve a universal, diversified, sufficient, and high-quality energy supply with competitive prices, ensuring public access to advanced technologies at reduced costs. This, in turn, is expected to enhance the quality of life and reduce social inequality [86].

2.4 Agrivoltaics in Mexico.

Currently, in Mexico, the adoption of agrivoltaic systems is being promoted primarily at the research level, with various projects developed in universities across the country (see Table 4 and Figure 2).

2.4.1 “Proyecto Agrivoltaics” (Agrivoltaics Project) - IER-UNAM and Solarever – Temixco, Morelos.

The Instituto of Energías Renovables of the Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM), in collaboration with the Mexican company Solarever, has developed the "Proyecto Agrivoltaics" (Agrivoltaics Project), in which a custom-designed photovoltaic module prioritizes crop health by allowing sufficient solar radiation to reach the crops growing beneath the photovoltaic array. The module consists of 144 cells, with 50% removed in a staggered pattern, forming a chessboard-like design.

The project has reached Technology Readiness Level (TRL) 3, indicating that analytical studies and simulations have validated the concept. Solarever has manufactured and donated 25 chessboard-type photovoltaic modules, each with a peak power of 200 W, covering a total area of 30 m² [87]–[89].

2.4.2 “Proyecto PASE” (PASE Project) - IER-UNAM and FMVZ – San Miguel Topilejo, Alcaldía de Tlalpan.

IER-UNAM and the Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ), in collaboration with the University of Arizona, developed “Proyecto PASE” (Sustainable and Educational Agrivoltaic Plot), funded by the Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología, e Innovación de la Ciudad de México (SECTEI).

Located in Topilejo, within the Tlalpan Municipality, the PASE project spans approximately 350 m². The 40 kW power plant includes 72 photovoltaic modules and a rainwater collection system with a storage capacity of 145 m³. It cultivates 10 crop species, planted in an intercropping system, and also includes solar dehydrators. This project promotes not only agricultural and energy production but also the education and training of students, farmers, and the general public in sustainable technologies [90]–[94].

2.4.3 “Seguridad Energética, Hídrica y Alimentaria para Pueblos Originarios en Regiones Costeras Semiáridas del Norte de México” (Energy, Water, and Food Security for Indigenous Peoples in Semi-Arid Coastal Regions of Northern Mexico) – Universidad de Sonora - Punta Chueca and El Desemboque.

The Universidad de Sonora (University of Sonora, UNISON), supported by the Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías (National Council of Science and Technology, CONACYT) and in partnership with multiple institutions (University of Arizona, Ohio University, the Instituto Tecnológico de Sonora (Technological Institute of Sonora, ITSON), and the Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD)), implemented an initiative aimed at addressing the interconnected challenges faced by local communities. A key strategy was the installation of photovoltaic systems to supply water to the communities of Punta Chueca and El Desemboque. In El Desemboque, frequent power outages caused by unpaid electricity bills have seriously affected water access and overall living conditions. To address this, photovoltaic systems with capacities of 386 kW and 17.5 kW, respectively, were installed in both communities. These systems significantly reduce the electricity consumption of local water wells, making electricity costs more manageable for this low-income population.

In addition to securing the water supply, the project also promotes food security through the creation of community-based agrivoltaic gardens, such as the one in El Desemboque, which spans 225 m². These gardens, developed under photovoltaic modules, aim to supply fresh produce to local families [95]–[97].

2.4.4 “Agrovoltaica en la Universidad del Sur de Morelos” (Agrivoltaics at the Technological University of the South of Morelos State) – Universidad Tecnológica del Sur del Estado de Morelos – Estado de Morelos.

The “Agrovoltaica en la Universidad del Sur de Morelos” project (Agrivoltaics at the Technological University of the South of Morelos State) at the Universidad Tecnológica del Sur del Estado de Morelos (Technological University of the South of Morelos State, UTSEM) was developed by the Bachelor’s Degree in Sustainable and Protected

Agriculture, in collaboration with the Mexico-Canada Learning Together Association. The project was designed to revitalize agricultural activity in areas affected by water scarcity and extreme weather conditions. It began in 2022 with an experimental phase involving the cultivation of serrano chili peppers, successfully demonstrating the feasibility of agriculture under photovoltaic modules. The agrivoltaic system features a fixed structure with eight 450 W monocrystalline photovoltaic modules, providing a total installed capacity of 3.6 kW [98], [99].

2.4.5 “Red Agrovoltaica Mexicana” (Mexican Agrivoltaic Network)

In 2023, the Red Agrovoltaica Mexicana (RAME) was established to foster the analysis, dissemination, promotion, and exchange of experiences related to agrivoltaic projects in Mexico. The network is organized into three committees: linkage, research, and dissemination.

The linkage committee aims to build collaborations with public, private, and civil society entities. RAME facilitates the dissemination of calls for proposals and project opportunities, and serves as a platform for connecting professionals and stakeholders interested in advancing agrivoltaic initiatives.

The research committee focuses on knowledge sharing and cooperation with the public sector to promote the inclusion of agrivoltaic projects in governmental funding programs.

It also contributes technical input that can support the design of policy instruments aligned with national sustainability goals.

The dissemination committee is dedicated to spreading awareness of the benefits, challenges, and success stories of agrivoltaics in Mexico, using strategic communication to enhance public understanding and support [100].

Given its structure and national scope, RAME holds considerable potential to become a reference point for policy dialogue, particularly by articulating the needs of researchers, practitioners, and local communities. For example, it could contribute to regulatory development through collaboration with institutions such as the Secretaría de Energía (SENER), the Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ministry of the

Environment and Natural Resources, SEMARNAT), or the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Ministry of Science, Humanities, Technology, and Innovation, SECIHTI), thereby aligning agrivoltaic initiatives with national energy, environmental, and research agendas. In addition, RAME could play a key role in coordinating pilot projects by promoting standardized methodologies, monitoring frameworks, and knowledge transfer mechanisms that facilitate scalability and replication.

Table 4. Agrivoltaic projects in Mexico.

No.	Name	Location	University	Funded by	Array	Crops
1	“Agrivoltaics”.	Temixco, Morelos.	UNAM	Solarever.	25 chessboard-type modules (5 kW).	Vegetables.
2	“PASE”.	Alcaldía de Tlalpan, Ciudad de México.	UNAM	SECTEI.	72 modules (40 kW).	Broccoli, red onion, green and purple cabbage, italian lettuce, white onion, cauliflower, sangria lettuce and chard.
3	“Seguridad Energética, Hídrica y Alimentaria para Pueblos Originarios en Regiones Costeras Semiáridas del Norte de México”.	Punta Chueca, Sonora and El Desemboque, Sonora.	UNISON	Call FOP04-2021-03 “Proyectos nacionales de investigación e incidencia para transitar a un sistema energético social y ambientalmente sustentable” CONACYT.	10 arrays with de 3 modules each one (13 kW).	Endemic species.
4	“Agrovoltaica en la Universidad del Sur de Morelos”.	Ixtla de Morelos, Morelos.	UTSEM	Mexico-Canada Learning Together Association	8 monocrystalline modules of 450W (3.6 kW).	Serrano chili.



Figure 2. Agrivoltaic projects in Mexico: a) Agrivoltaics; b) PASE; c) Seguridad Energética, Hídrica y Alimentaria para Pueblos Originarios en Regiones Costeras Semiáridas del Norte de México; d) Agrovoltaica en la Universidad del Sur de Morelos.

3. Methodology.

3.1 Agrivoltaic electricity potential estimation.

The estimation of the agrivoltaic potential in Mexico was carried out with the goal of calculating the electricity generation capacity through the implementation of agrivoltaic systems across the 32 states of the republic. This study integrates information on agronomically relevant crops in the country that have been previously researched under agrivoltaic systems, as well as data on the planted area of the selected crops, their agrivoltaic density, the average solar irradiance levels by state, and the assumed photovoltaic efficiency. In Figure 3, the process followed in this study is graphically illustrated.

To select the crops to evaluate, a review of previous studies on agrivoltaics at the global level was conducted, with the results presented in Table 1. Next, those crops that have been studied in agrivoltaic systems and are also produced in Mexico were identified. The

selected crops, based on their agricultural relevance in the country and prior agrivoltaic research, are: maize, wheat, green chili, onion, tomato, broccoli, rice, zucchini, lettuce, carrot, strawberry, blackberry, raspberry, and eggplant. Data on the planted area of each of these crops in the 32 states of Mexico were then collected. This information was extracted from the 2023 Statistical Yearbook of Agricultural Production by the Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) [74], and was accessed on February 15 2025 through its online statistical query platform (https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/). Because our analysis focuses exclusively on crops with documented agrivoltaic relevance, crops without agrivoltaic evidence or with marginal production were excluded. Consequently, the state and national totals presented here correspond to this filtered subset rather than to the full SIAP aggregate.

In this study, agrivoltaic density is defined as the ratio between the area covered by the photovoltaic modules and the cultivated land area, without accounting for time-dependent shadow projection. This definition is based on the surface-coverage criterion employed in the Ground Coverage Ratio (GCR) [101]. A 100% agrivoltaic density corresponds to the case in which the separation between modules becomes zero and the photovoltaic modules fully cover the cultivated area. The agrivoltaic density is adjusted according to the specific solar radiation requirements of each crop.

In this context, to determine the agrivoltaic density to use for each crop, a review of previous studies was conducted. In cases where the reviewed studies directly reported agrivoltaic density, these values were adopted as references. In the absence of explicit data, agrivoltaic density was estimated based on the percentage of ground coverage by the photovoltaic modules over the planted area. Table 5 presents the recommended agrivoltaic densities from the analyzed studies for each of the crops considered in this work.

Subsequently, average irradiance data for each state in the country was obtained using the NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) database [102]. The agrivoltaic potential was calculated assuming a baseline photovoltaic efficiency of 20%, which was selected to avoid overestimating generation potential while providing achievable estimates. Representing a realistic performance range for commercially available

photovoltaic technologies, a sensitivity analysis was performed using efficiencies of 18% (-2%) and 22% (+2%) relative to the baseline.

Finally, to estimate the electricity generation potential through agrivoltaic systems in Mexico, Eq. (1) was proposed, applied individually to each state of the republic, and to each of the selected crops:

$$\sum_{i=\text{crop}}^n \mathbf{Potential}_{apv} = \rho_i * G * A_i * \eta \quad (1)$$

Where:

- $Potential_{apv}$ is the agrivoltaic potential for crop i (kWh day⁻¹),
- ρ_i is the agrivoltaic density of photovoltaic modules applied to crop i (%),
- G is the average irradiance of the site (kWh m⁻² day⁻¹),
- A_i is the area planted for crop i (m²),
- η is the efficiency of the photovoltaic module (%).

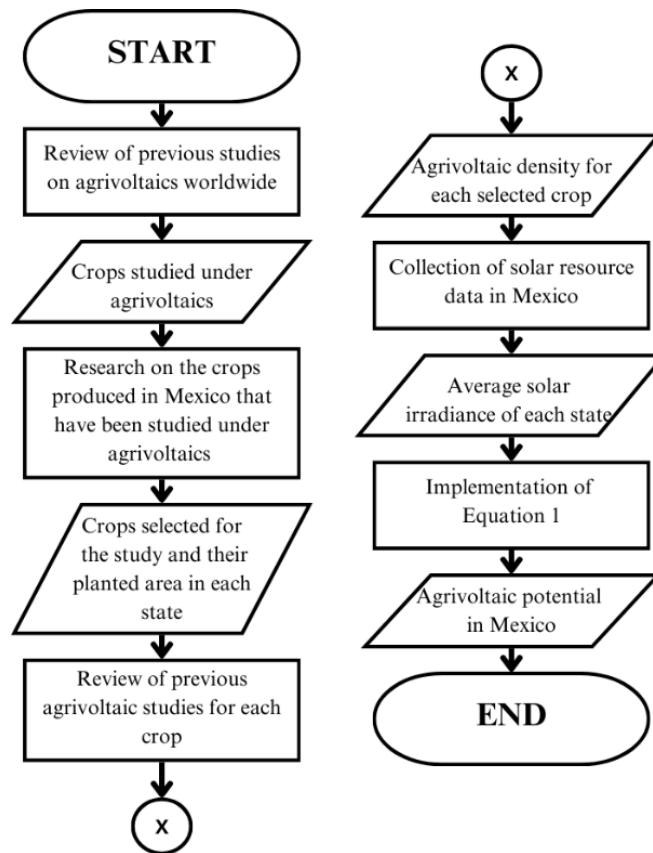


Figure 3. Methodological flowchart for estimating agrivoltaic potential in Mexico.

Table 5. Relation of the selected crops with the agrivoltaic density used in the literature.

No.	Crop	Land planted in Mexico (m ²)	Agrivoltaic density (%)	Reference
1	Maize	69,410,311,200	33	[22], [75], [76]
2	Wheat	5,650,223,300	33	[12], [26], [77]
3	Green chili	1,711,693,600	61	[23], [115]
4	Onion	558,137,200	15	[78], [79]
5	Tomato	408,481,200	50	[24], [80]–[82]
6	Broccoli	372,553,300	20	[83]
7	Rice	368,770,000	32	[116], [117]

8	Zucchini	260,319,800	25	[84]
9	Lettuce	227,960,300	35	[12], [20], [85], [86]
10	Carrot	117,262,000	32	[87], [88]
11	Strawberry	105,067,100	65	[118], [119]
12	Blackberry	101,803,800	25	[120]
13	Raspberry	25,344,600	60	[121]
14	Eggplant	15,691,200	22	[89]–[91]

3.2 Reference levelized cost of electricity (LCOE) estimation.

A country-level, per-kWp (LCOE) was estimated (Eq. (2)) to provide an economic frame consistent with the agrivoltaic potential maps. Energy yield was parameterized with the long-term photovoltaic power potential (PVOUT) for Mexico from the Solar Resource Map © 2021 Solargis [82] ($\approx 3.8\text{--}5.4 \text{ kWh kWp}^{-1} \text{ day}^{-1}$; rounded to 4–6 for readability). For a 1 kWp system, year-1 output is given by $Y_1 = s \times 365 \text{ kWh}$, where s denotes PVOUT; subsequent years decline at a fixed performance degradation of $d=1\%$ per year.

Costs distinguish ground-mounted (GM) photovoltaic from agrivoltaic (APV). Absolute capital expenditures (CAPEX) are expressed in USD kWp-1. Values of 0.73 kUSD kWp-1 for GM and 1.15 kUSD kWp-1 for APV were adopted, consistent with the reported IEA PVPS cost breakdown [119]. Operating expenditures (OPEX) are represented as an annual charge proportional to CAPEX, with ratios of 1.1% yr-1 for APV and 2.2% yr-1 for GM, corresponding to 12.67 USD kWp-1 and 16.09 USD kWp-1, respectively [64]. It should be noted that the difference between APV and GM OPEX is attributed to mowing and land-related costs, which are largely absorbed by agricultural activities. Financial assumptions are in real terms, with no cost escalation. A baseline weighted average cost of capital (WACC) of 7% is adopted [120]. Because this parameter is inherently project- and region-specific, a sensitivity analysis is conducted by varying WACC, which is used as the discount rate in the LCOE formulation, within a plausible range of 5% to 10%, while all other parameters are held constant. The project lifetime is set to $N=25$ years. Unless

otherwise indicated, taxes, incentives, salvage value, and mid-life major replacements are excluded.

Under these assumptions, LCOE is defined as the ratio of the discounted sum of costs to the discounted sum of delivered energy over N years:

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX}{(1+WACC)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{Y_1(1-d^t)}{(1+WACC)^t}} \quad (2)$$

All quantities are normalized per 1 kWp. Assuming costs scale linearly with capacity and CAPEX/OPEX per kWp are location-invariant, the LCOE is size-invariant and varies inversely with the local PVOUT (s). Site-level values are obtained by substituting the local s into the LCOE expression (equivalently, by proportional scaling from a reference s_{ref}). While energy yield is site-dependent through PVOUT (s), balance-of-system and structural cost premiums may differ across sites and policy contexts and are not resolved in this national-scale assessment.

4 Results and Discussion.

The scope of this study is intentionally focused on estimating the theoretical potential for photovoltaic electricity generation through the implementation of agrivoltaic systems in Mexico at a national and state level. The analysis relies on agrivoltaic density values reported in the international literature for crops that are also cultivated in Mexico. These values were adopted as reference parameters to approximate the interaction between photovoltaic coverage and agricultural land use. However, agrivoltaic systems are inherently dependent on local conditions, including climate, latitude, crop variety, management practices, and system design.

Accordingly, no yield penalties or gains are explicitly modeled; thus, the analysis implicitly assumes that crop productivity remains comparable to conventional (non-agrivoltaic) cultivation.

4.1 Agrivoltaic electricity potential

Figure 4 shows the results obtained from Eq. (1), reflecting the agrivoltaic potential in each state of the Mexican Republic, measured in terawatt-hours per year (TWh yr⁻¹). The states with the highest agrivoltaic potential are Sinaloa (919.16 TWh yr⁻¹; 827.25-828.58 TWh yr⁻¹ under 18% and 22% photovoltaic efficiency), Chiapas (885.77; 797.20-974.35 TWh yr⁻¹), and Jalisco (870.57; 783.51-957.63 TWh yr⁻¹). Sensitivity analysis confirms that varying photovoltaic efficiency within this range alters absolute values proportionally but does not modify the relative ranking of states.

This high potential is due to the combination of two key factors: favorable solar irradiance, with average values of 5.84 kWh m⁻², 5.24 kWh m⁻², and 5.93 kWh m⁻², respectively, and a large availability of agricultural land, with 627,439.14 hectares in Sinaloa, 693,744.97 hectares in Chiapas, and 599,195.78 hectares in Jalisco.

Despite having the lowest solar irradiance among the three, Chiapas compensates for this disadvantage with the largest extent of agricultural land, allowing it to rank as the second state with the greatest agrivoltaic potential. On the other hand, Sinaloa leads due to its higher irradiance and the fact that 16,294 hectares of its agricultural land are dedicated to green chili cultivation, which has an agrivoltaic density of 61%, optimizing the energy yield of the system.

However, the distribution of photovoltaic plants across the country is uneven. In particular, Jalisco has few installations relative to its capacity, representing an opportunity for agrivoltaic project development. In Sinaloa and Chiapas, where land is mainly used for agricultural activities, the lack of photovoltaic plants is due to the priority given to agriculture. However, agrivoltaics would allow the integration of photovoltaic infrastructure without compromising agricultural production, thus facilitating its implementation in regions with the highest potential.

In contrast, states with lower agrivoltaic potential, such as Mexico City (5.29; 4.76-5.82 TWh yr⁻¹), Colima (23.09; 20.78-25.40 TWh yr⁻¹), and Aguascalientes (23.79; 21.41-26.17 TWh yr⁻¹), face limitations due to their scarcity of agricultural land, which restricts their agrivoltaic generation capacity. Nevertheless, they could implement agrivoltaic

systems in crops with an optimal relationship between agrivoltaic density and cultivated area, or adopt vertical agrivoltaic models.

On the other hand, in states such as Sonora and Chihuahua, the expansion of agrivoltaics could leverage existing photovoltaic plant infrastructure. In these cases, the presence of photovoltaic plants represents an advantage for implementing agrivoltaic systems within existing facilities, allowing dual land use without requiring additional land. While in Jalisco and Sinaloa, the challenge lies in the scarcity of photovoltaic plants, in Sonora and Chihuahua, the challenge is to adapt existing systems to include agricultural production beneath the photovoltaic modules. This strategy would allow for increased agricultural and energy production simultaneously, optimizing land use.

Agrivoltaic electricity potential

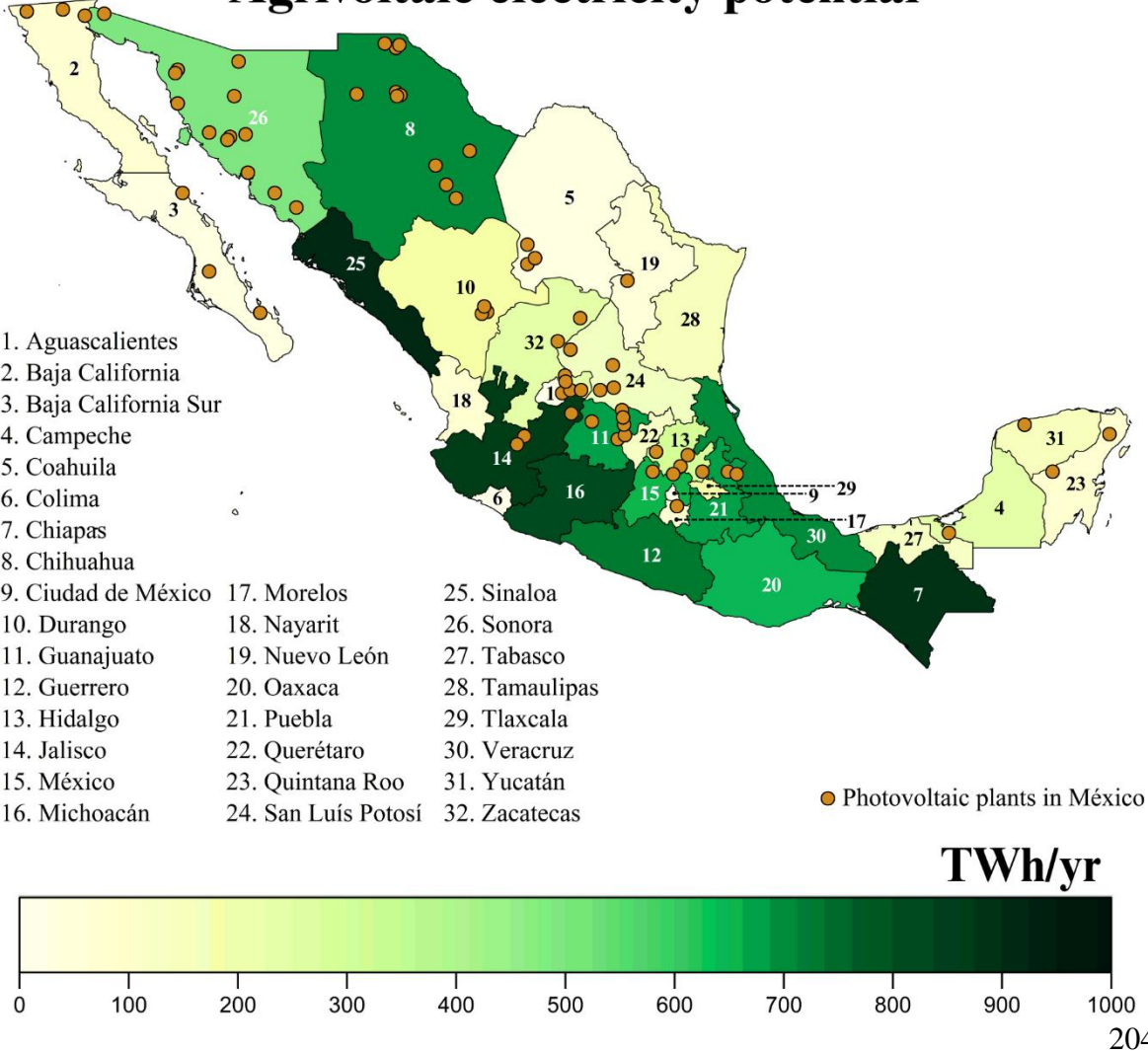


Figure 4. Agrivoltaic electricity potential by state for the baseline scenario of 20% PV efficiency. Values scale proportionally ($\pm 10\%$) for efficiencies of 18% and 22%, without altering the relative ranking of states.

Figure 5 presents an analysis of the agrivoltaic potential of each selected crop, considering both the total cultivated area nationwide and the agrivoltaic potential per hectare. For total area, maize exhibits the highest potential for electricity generation (9,219.89 TWh yr⁻¹), followed by wheat (809.12 TWh yr⁻¹) and green chili (435.07 TWh yr⁻¹). These crops are representative of the extensively cultivated in Mexico and often occupy areas well-suited to agrivoltaic deployment. Maize demonstrates the highest potential due to the large land area devoted to its production in Mexico, as well as its compatibility with the partial shading generated by photovoltaic modules. Under photovoltaic efficiency scenarios of 18% and 22%, generation estimates vary from 8,297.90 to 10,141.88 TWh yr⁻¹ for maize, 728.21 to 890.03 TWh yr⁻¹ for wheat, and 391.56 to 478.58 TWh yr⁻¹ for green chili, with no change in the relative ranking of crops.

However, when analyzing the potential on a per-hectare basis, the crops with the highest values are strawberry (2.73 GWh yr⁻¹ ha⁻¹), raspberry (2.55 GWh yr⁻¹ ha⁻¹), green chili (2.51 GWh yr⁻¹ ha⁻¹), and tomato (2.04 GWh yr⁻¹ ha⁻¹). This is because the agrivoltaic densities considered for these crops range from 50% to 60%, representing an attractive crop area–photovoltaic area ratio. Partial shading under these conditions can reduce water stress and improve growth conditions. Under the same sensitivity scenarios, strawberry varies from 2.46 to 3.01 GWh yr⁻¹ ha⁻¹, raspberry from 2.32 to 2.84 GWh yr⁻¹ ha⁻¹, green chili from 2.28 to 2.79 GWh yr⁻¹ ha⁻¹, and tomato from 1.86 to 2.28 GWh yr⁻¹ ha⁻¹, maintaining their comparative advantage.

These findings highlight the potential for greater agricultural diversification in Mexico through crops that are well-suited to agrivoltaic systems. In addition to open-field staples like maize and wheat, high-value crops such as strawberries, blackberries, and raspberries appear viable within this framework, potentially offering new economic opportunities for farmers.

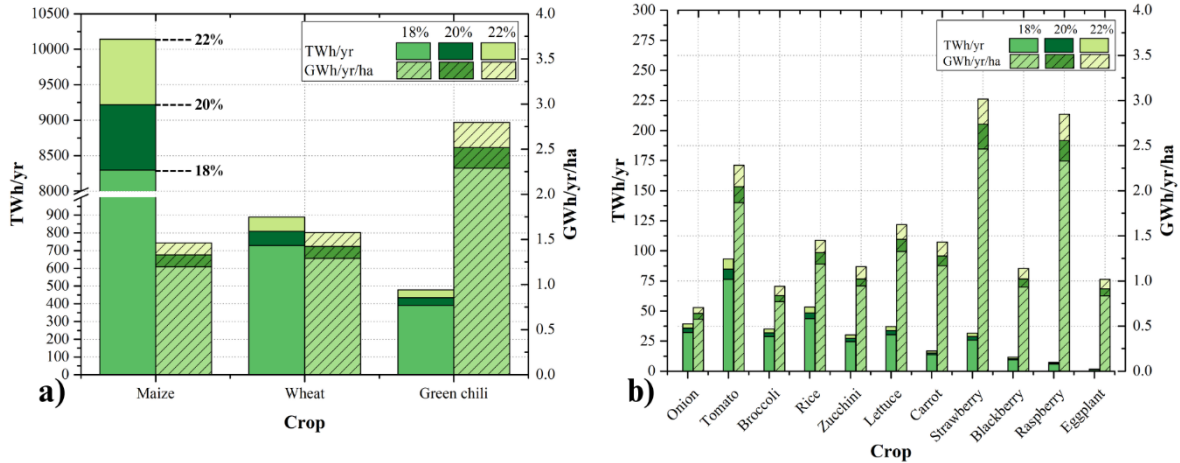


Figure 5. Agrivoltaic potential by crop and per hectare. a) Major crops; b) Remaining selected crops.

On a per-hectare basis, agrivoltaic systems exhibit an estimated electricity generation potential ranging from 0.57 GWh yr^{-1} for onion crops assuming a photovoltaic efficiency of 18% to 3.01 GWh yr^{-1} for strawberry crops assuming a photovoltaic efficiency of 22%. This range reflects both optimal solar radiation conditions and the adaptability of the agrivoltaic system to the selected crops, allowing for solar energy utilization without significantly compromising agricultural production. The capability to generate electricity from agricultural land represents a key opportunity to enhance rural space utilization and diversify the national energy portfolio.

Implementing agrivoltaic systems with an estimated potential of $0.63 \text{ GWh yr}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ (onion crop under the baseline scenario of 20% photovoltaic efficiency) across 1% of the agricultural land dedicated to the selected crops ($\approx 79,814.25 \text{ ha}$) could yield approximately $51,098 \text{ GWh yr}^{-1}$ of electricity, equivalent to supplying about 14.79% of the national annual electricity consumption ($345,439 \text{ GWh}$ [79]). Sensitivity to $\pm 2\%$ efficiency (18%–22%) yields a range of 13.31%–16.27%, consistent with the 2030 energy matrix target announced at COP27 [84]. Using an emission factor of $0.438 \text{ tCO}_2\text{e MWh}^{-1}$ [121], this generation potential corresponds to an annual reduction of $22,381,254$ metric tons of CO_2 , equivalent to removing approximately $4,865,490$ vehicles from circulation for one year, representing a substantial contribution to reducing the carbon footprint in the energy and transportation sectors in the country [122].

Such a contribution would mark a significant advancement in the energy transition, supporting energy diversification and reducing dependence on fossil fuels. The integration of these systems would steer the country toward a more sustainable energy matrix, while promoting food security.

Figure 6 presents the agrivoltaic electricity generation potential as a function of cultivated area, assuming a photovoltaic efficiency of 20% as the baseline scenario. To facilitate broader interpretation and comparison of results, the individual crops analyzed throughout this study were grouped into five categories according to their agricultural type and similarities in management practices: cereals, fruit vegetables, root crops, leafy greens, and berries (see Figure 6 for category visualization).

Panels (a) and (b) distinguish between the categories with the largest cultivated areas (cereals and fruit vegetables) and the remaining categories (root crops, leafy greens, berries). In these plots, steeper slopes correspond to higher electricity generation potential per unit area. This pattern reflects the influence of high-performing crops within each category. For example, the fruit vegetables group shows the highest slope (6.49 GWh yr⁻¹ ha⁻¹), driven mainly by green chili (2.51 GWh yr⁻¹ ha⁻¹) and tomato (2.04 GWh yr⁻¹ ha⁻¹), while the berries group follows closely (6.31 GWh yr⁻¹ ha⁻¹), due to the strong contribution of strawberry (2.73 GWh yr⁻¹ ha⁻¹) and raspberry (2.55 GWh yr⁻¹ ha⁻¹).

The intersections between the category curves and the horizontal reference lines indicate the cultivated area required to achieve specific fractions of the national annual electricity consumption. For instance, cereals, the category with the largest cultivated area (7.54 million ha), could meet 100% of the annual electricity consumption of Mexico with approximately 100,000 ha, nearly 1.32% of their current planted area. In contrast, fruit vegetables, despite having much smaller cultivated area could meet 50% of the consumption with about 30,000 ha (12.5% of their cultivated area). Meanwhile, berries could supply 40% of the annual consumption with about 18,000 ha, representing 77.5% of their current planted area.

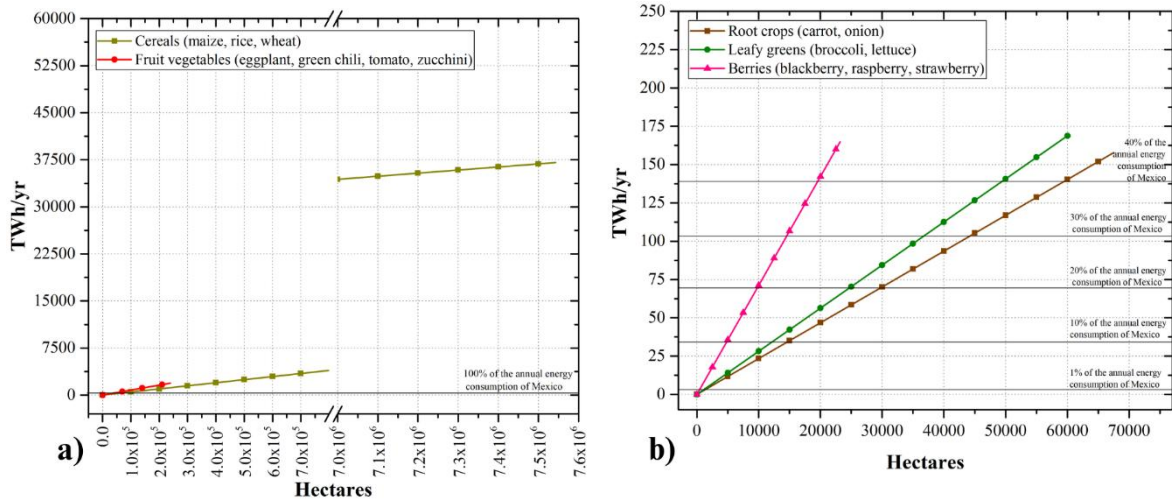


Figure 6. Agrivoltaic potential per hectare by crop category. a) Cereals, fruit vegetables; b) Root crops, leafy greens, berries.

Although the full deployment of agrivoltaics over the 14 analyzed crops would yield an estimated $21.30 \text{ GWh yr}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, the relevance of this potential depends in part on how crops are managed over time. In Mexico, crop rotation is currently practiced on only 21.9% of cultivated land [123]. Despite this limitation, rotation remains a valuable agronomic strategy due to its benefits for soil health, pest and disease management, and long-term yield stability [124].

To explore the implications of rotation for agrivoltaic planning, the results were organized into categories that satisfy both rotational compatibility and similarity in agrivoltaic density (see Table 6 for group definitions). Group A (lettuce, rice, wheat, maize, carrot), whose members are rotationally compatible, falls within an agrivoltaic density range of 30%–35% and contributes $6.85 \text{ GWh yr}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, representing 32.1% of the total potential. Group B (zucchini, eggplant, broccoli, onion), also composed of rotationally compatible crops, is characterized by an agrivoltaic density range of 15%–25% and contributes $3.47 \text{ GWh yr}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, or 16.3% of the total. Perennial caneberries (raspberry, blackberry), which cannot be integrated into annual rotation schemes due to their multi-year growth cycles, contribute $3.62 \text{ GWh yr}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ (17.0%). Together, these rotationally compatible and perennial crops account for 65.4% of the national agrivoltaic potential.

In contrast, strawberry, tomato, and green chili cannot be assigned to any rotation-compatible agrivoltaic density group identified in this study. Strawberry, despite being a rotational crop, has a high agrivoltaic density requirement (65%) and no suitable rotational partner with similar agrivoltaic density among the crops analyzed. Tomato and green chili share a similar density ($\approx 50\%$ – 61%), but both belong to the Solanaceae family, making them agronomically incompatible for direct rotation due to shared pest and disease pressures. As a result, these three crops remain non-groupable within the current framework. Collectively, they deliver 7.35 GWh yr^{-1} , equivalent to 34.5% of the total potential, from only 2.8% of the cultivated area considered. Within this subset, strawberry contributes 12.8%, green chili 11.9%, and tomato 9.7% of the total potential.

Under a strict rotation scenario that includes only Groups A, B, and perennials, the national agrivoltaic potential would decrease from $21.30 \text{ GWh yr}^{-1}$ to $13.95 \text{ GWh yr}^{-1}$, a reduction of 34.5%. This figure represents the maximum possible loss under the extreme assumption that all cultivated land follows crop rotation and the non-groupable crops are entirely excluded.

Table 6. Classification of crops into rotational and non-groupable categories according to agrivoltaic density and APV generation potential.

Category	Crops	ρ_i (%)	Potential _{apv} (GWh yr ⁻¹ ha ⁻¹)	% of total
Group A	Lettuce, rice, wheat, maize, carrot.	30-35.	6.85.	32.1.
Group B	Zucchini, eggplant, broccoli, onion.	15-25.	3.47.	16.3.
Perennials	Raspberry, blackberry.	60 (blackberry) 25 (raspberry).	3.62.	17.0.
Non-groupable	Strawberry.	65.	2.73.	12.8.
	Tomato.	50.	2.04.	9.7.
	Green chili.	61.	2.51.	11.9.

The successful implementation of agrivoltaic systems for the crops analyzed in this study faces several specific challenges that must be addressed to ensure their viability and effectiveness. These challenges are summarized in Table 7, categorized into technical, economic, and social aspects.

Table 7. Challenges in the implementation of agrivoltaics in Mexico and suggestions to overcome them.

Technical aspects		
Challenge	Description	Suggestion
Structure of photovoltaic systems.	Each crop has specific vertical space requirements that must be respected to ensure proper growth and facilitate agricultural tasks.	The height of the system must be analyzed before carrying out the civil work, as once the site is adapted, it will be suitable only for certain crops or will need to ensure flexibility for different types of crops.
Simulation and design tools.	Uncertainty in crop and energy outcomes due to limited local	Use simulation tools (e.g., crop-radiation models) to estimate yields and energy under different

	feasibility studies.	layouts and shading conditions.
Electrical infrastructure.	In rural areas, the electrical infrastructure is limited or nonexistent.	Additional investments are needed in transmission lines, interconnection stations, or microgrids.
Energy storage.	The intermittency of photovoltaic energy requires battery storage systems to ensure the stability of the energy supply.	Incorporating batteries as an essential component in agrivoltaic systems and promoting the development of storage technologies.
Economic aspects		
Challenge	Description	Suggestion
Initial investment costs.	The installation of agrivoltaic systems requires a high initial investment, including photovoltaic modules, support structures, inverters, batteries, and monitoring systems.	Implement financial incentives and government programs to support small and medium-sized farmers.
Social aspects		
Challenge	Description	Suggestion
Technical knowledge and training.	The lack of technical experience in photovoltaic systems and their integration with agriculture, including the maintenance of modules and the management of crops under shade.	Establish training programs and technical assistance for farmers and installers.
Resistance to change and perception of risks.	Traditional farmers may resist adopting agrivoltaics due to uncertainty about long-term benefits and risks.	Raise awareness about the long-term benefits of agrivoltaics with practical evidence and pilot results.
Limited short-term adoption of crop rotation in APV systems.	Low prevalence of crop rotation in Mexico reduces the likelihood of immediate adoption of rotation-based APV designs.	Highlight compatible crop groupings in APV planning to showcase potential yield and economic benefits.

4.2 Reference levelized cost of electricity (LCOE).

With the adopted parameters, the LCOE declines with solar resource and, over the range relevant for Mexico (PVOUT $s, \approx 4-6$ kWh kWp⁻¹ day⁻¹), the dependence is approximately linear. With the adopted assumptions, the LCOE for GM falls from 0.059 to 0.039 USD kWh⁻¹ as s increases from 4 to 6, while APV drops from 0.083 to 0.055 USD kWh⁻¹ over the same interval; at an intermediate resource level ($s \approx 5$) the values are 0.047 USD kWh⁻¹ (GM) and 0.067 USD kWh⁻¹ (APV). The APV/GM ratio remains constant ($\sim 1.41 \times$ GM) across all solar resource levels, governed primarily by the CAPEX differential and, to a lesser extent, by the OPEX fractions. In absolute terms, the gap between technologies narrows at higher PVOUT because the energy denominator grows faster than costs.

These magnitudes are consistent with the agrivoltaic economics literature, which reports APV LCOE values around 70–90 USD MWh⁻¹ ($\approx 0.07-0.09$ USD kWh⁻¹) [125][126]. Given the comparatively high PVOUT considered here and the adopted CAPEX assumptions, estimates align with those benchmarks. Notably, if OPEX were identical across technologies, the APV/GM ratio would approach the CAPEX-only differential ($\sim 1.57 \times$), slightly above the $\sim 1.41 \times$ observed here with 1.1% yr⁻¹ for APV and 2.2% yr⁻¹ for GM. Varying the weighted average cost of capital (WACC) between 5% and 10% produces a systematic shift in absolute LCOE values. Across the evaluated PVOUT range, LCOE values change by approximately -14% to $+23\%$ relative to the baseline case (WACC = 7%). Within this sensitivity range, the relative comparison between GM and APV remains consistent.

Conclusions.

The study demonstrates that agrivoltaics in Mexico holds significant potential for electricity generation, particularly in states with high solar irradiance and extensive agricultural land, such as Sinaloa, Chiapas, and Jalisco, with estimated potentials of 919.16 TWh yr⁻¹, 885.77 TWh yr⁻¹, and 870.57 TWh yr⁻¹, respectively. A sensitivity analysis varying photovoltaic efficiency between 18% and 22% resulted in proportional changes of $\pm 10\%$ in these estimates without altering the relative ranking. Implementing agrivoltaic systems could enable dual land use without compromising agricultural productivity, supporting both food security and the energy transition.

At the crop level, strawberries (2.73 GWh yr⁻¹ ha⁻¹), raspberries (2.55 GWh yr⁻¹ ha⁻¹), green chili (2.51 GWh yr⁻¹ ha⁻¹), and tomatoes (2.04 GWh yr⁻¹ ha⁻¹) yielded the highest per-hectare outputs. Their compatibility with high-density photovoltaic layouts optimizes solar capture without hindering crop growth, and the $\pm 10\%$ efficiency sensitivity analysis confirmed the robustness of this ranking. Applying agrivoltaics to just 1% of the agricultural land dedicated to the selected crops could supply 13.27%–16.22% of national electricity consumption, while substantially reducing CO₂ emissions.

Incorporating crop rotation shows that, although full deployment of the fourteen crops could reach 21.30 GWh yr⁻¹ ha⁻¹, only 21.9% of cultivated land currently rotates crops. Grouping by rotational compatibility and similar densities indicates that rotation-friendly groups and perennials account for 65.4% of potential, while non-groupable high-yield crops (strawberry, tomato, green chili) represent 34.5% from only 2.8% of the analyzed area. Excluding these crops under a strict rotation could reduce the potential by up to 34.5%. Seasonal tracking and dynamic shading could help integrate and rotate crops with different light requirements, recovering part of this loss while preserving agronomic benefits.

A preliminary country-level LCOE assessment for Mexico shows that over the relevant PVOUT range ($s \approx 4\text{--}6$ kWh kWp⁻¹ day⁻¹), LCOE decreases almost linearly: GM from 0.059 to 0.039 USD kWh⁻¹ and APV from 0.083 to 0.055 USD kWh⁻¹; at $s \approx 5$, values are 0.047 USD kWh⁻¹ (GM) and 0.067 USD kWh⁻¹ (APV). The APV/GM ratio ($\sim 1.41\times$) reflects the adopted CAPEX and OPEX structure and aligns with international agrivoltaic benchmarks (0.07–0.09 USD kWh⁻¹). Reasonable variations in WACC shift absolute LCOE levels; in this sensitivity analysis, the GM–APV ranking and the spatial patterns remain consistent

Agrivoltaic deployment in Mexico remains at an early stage and faces technical, economic, and social challenges, including the need to adapt photovoltaic structures to diverse crop systems, overcome limited electrical infrastructure in rural areas, and reduce resistance to innovation within the agricultural sector. Future research should therefore prioritize site-specific validation of agrivoltaic systems through field experiments, enabling the refinement of energy estimates and the evaluation of crop responses under real operating conditions. In this context, advanced simulation tools, particularly crop–radiation

interaction models, can support early-stage system design by assessing energy performance, yield responses, microclimatic effects, and water-use dynamics across different agroecological regions. Coupled with coordinated public policies, targeted financing, and capacity-building initiatives, these efforts can enable scalable, location-adapted agrivoltaic solutions and position agrivoltaics as a key component of sustainable rural development and the low-carbon energy transition in Mexico.

Acknowledgements

We would like to thank Universidad Autónoma de Baja California and Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) for their invaluable guidance and support during this research

CRedit authorship contribution statement

N.A. Pérez de Alva: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing – Original draft, Visualization, Project Administration. **S. Islas-Pereda:** Conceptualization, Methodology, Writing - Review & Editing, Project administration, Supervision. **N. Velázquez Limón:** Resources, Writing - Review & Editing. **J.A. Aguilar-Jiménez:** Conceptualization, Writing - Review & Editing, **J.D. Gamez-Aviles:** Writing - Review & Editing.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of competing interest

The authors have no conflicts of interest to disclose.

References.

- [1] L. La Notte et al., “Hybrid and organic photovoltaics for greenhouse applications,” *Appl. Energy*, vol. 278, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115582.
- [2] N. M. Syano, M. M. Nyangito, G. Kironchi, and O. V. Wasonga, “Agroforestry practices impacts on soil properties in the drylands of Eastern Kenya,” *Trees, For. People*, vol. 14, p. 100437, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.TFP.2023.100437.

- [3] J. L. Monteith, C. K. Ong, and J. E. Corlett, “Microclimatic interactions in agroforestry systems ☆,” *For. Ecol. Manage.*, 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90204-9](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90204-9).
- [4] J. Rodenburg, E. Mollee, R. Coe, and F. Sinclair, “Global analysis of yield benefits and risks from integrating trees with rice and implications for agroforestry research in Africa,” *F. Crop. Res.*, vol. 281, no. February, p. 108504, 2022, doi: [10.1016/j.fcr.2022.108504](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108504).
- [5] J. E. Lott, C. K. Ong, and C. R. Black, “Understorey microclimate and crop performance in a *Grevillea robusta*-based agroforestry system in semi-arid Kenya,” doi: [10.1016/j.agrformet.2009.02.002](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.02.002).
- [6] A. ZASTROW, A. GOETZBERGER, “On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation,” *Int. J. Sol. Energy*, doi: [10.1080/01425918208909875](https://doi.org/10.1080/01425918208909875).
- [7] T. Makoto and T. Iida, “Evolution of agrivoltaic farms in Japan,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2361, 2021, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0054674>.
- [8] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, and Y. Ferard, “Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes,” *Renew. Energy*, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>.
- [9] L. C. Vidotto, K. Schneider, R. W. Morato, L. R. do Nascimento, and R. Rütther, “An evaluation of the potential of agrivoltaic systems in Brazil,” *Appl. Energy*, vol. 360, p. 122782, Apr. 2024, doi: [10.1016/J.APENERGY.2024.122782](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2024.122782).
- [10] S. Agir, P. Derin-Gure, and B. Senturk, “Farmers’ perspectives on challenges and opportunities of agrivoltaics in Türkiye: An institutional perspective,” *Renew. Energy*, vol. 212, pp. 35–49, Aug. 2023, doi: [10.1016/J.RENENE.2023.04.137](https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.04.137).
- [11] A. E. Coşgun, M. S. Endiz, H. Demir, and M. Özcan, “Agrivoltaic systems for sustainable energy and agriculture integration in Turkey,” *Heliyon*, vol. 10, no. 11, Jun. 2024, doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e32300](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32300).
- [12] A. S. Pascaris, A. K. Gerlak, and G. A. Barron-Gafford, “From niche-innovation to mainstream markets: Drivers and challenges of industry adoption of agrivoltaics in the U.S.,” *Energy Policy*, vol. 181, p. 113694, Oct. 2023, doi: [10.1016/J.ENPOL.2023.113694](https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2023.113694).
- [13] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, “Panorama Agroalimentario 2024,” Ciudad de México., 2024. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1NXcDhaB63Z94wjRUVF6f_FK0Urv6cgvJ/view.
- [14] E. Mouhib et al., “Enhancing land use: Integrating bifacial PV and olive trees in agrivoltaic systems,” *Appl. Energy*, vol. 359, p. 122660, Apr. 2024, doi: [10.1016/J.APENERGY.2024.122660](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2024.122660).

- [15] M. Varo-Martínez, L. M. Fernández-Ahumada, J. C. Ramírez-Faz, R. Ruiz-Jiménez, and R. López-Luque, "Methodology for the estimation of cultivable space in photovoltaic installations with dual-axis trackers for their reconversion to agrivoltaic plants," *Appl. Energy*, vol. 361, p. 122952, May 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.122952.
- [16] S. Amaducci, X. Yin, and M. Colauzzi, "Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production," *Appl. Energy*, vol. 220, pp. 545–561, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.03.081.
- [17] M. Trommsdorff et al., "Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 140, p. 110694, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110694.
- [18] R. C and F. E, "The spatial socio-technical potential of agrivoltaics in Germany," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 202, p. 114706, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2024.114706.
- [19] A. Sarr, Y. M. Soro, A. K. Tossa, and L. Diop, "A new approach for modelling photovoltaic panel configuration maximizing crop yield and photovoltaic array outputs in agrivoltaics systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 309, p. 118436, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2024.118436.
- [20] P. E. Campana, B. Stridh, S. Amaducci, and M. Colauzzi, "Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 325, p. 129091, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129091.
- [21] O.-H. Kwon and K.-S. Lee, "Agrophotovoltaic Designs: Irradiation Analysis on and under PV Modules," *J. Korean Sol. Energy Soc.* 2021 412, vol. 41, no. 2, pp. 9–23, Apr. 2021, doi: 10.7836/KSES.2021.41.2.009.
- [22] Y. Elamri, B. Cheviron, J. M. Lopez, C. Dejean, and G. Belaud, "Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces," *Agric. Water Manag.*, vol. 208, pp. 440–453, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.AGWAT.2018.07.001.
- [23] Z. Tahir and N. Zafar Butt, "Spatial-Temporal Shading Under Mobile & Fixed Tilt Bifacial Agrivoltaic Panels & Implications for the Cropping Practices," *SSRN Electron. J.*, Sep. 2021, doi: 10.2139/SSRN.3918961.
- [24] A. Perna, E. K. Grubbs, R. Agrawal, and P. Bermel, "Design Considerations for Agrophotovoltaic Systems: Maintaining PV Area with Increased Crop Yield," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 668–672, Jun. 2019, doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8981324.
- [25] E. Mengi, O. A. Samara, and T. I. Zohdi, "Crop-driven optimization of agrivoltaics using a digital-replica framework," *Smart Agric. Technol.*, vol. 4, p. 100168, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.ATECH.2022.100168.

- [26] V. Prakash et al., “Shading and PAR under different density agrivoltaic systems, their simulation and effect on wheat productivity,” *Eur. J. Agron.*, vol. 149, p. 126922, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.EJA.2023.126922.
- [27] T. Reher et al., “Potential of sugar beet (*Beta vulgaris*) and wheat (*Triticum aestivum*) production in vertical bifacial, tracked, or elevated agrivoltaic systems in Belgium,” *Appl. Energy*, vol. 359, p. 122679, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.122679.
- [28] H. Jo et al., “Comparison of Yield and Yield Components of Several Crops Grown under Agro-Photovoltaic System in Korea,” *Agric. 2022*, Vol. 12, Page 619, vol. 12, no. 5, p. 619, Apr. 2022, doi: 10.3390/AGRICULTURE12050619.
- [29] S. Amaducci, X. Yin, and M. Colauzzi, “Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production,” *Appl. Energy*, vol. 220, pp. 545–561, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.03.081.
- [30] M. I. Hermelink, B. Maestrini, and F. J. de Ruijter, “Berry shade tolerance for agrivoltaics systems: A meta-analysis,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 330, no. December 2023, p. 113062, 2024, doi: 10.1016/j.scienta.2024.113062.
- [31] G. N. Nguyen, N. Lantzke, and A. van Burgel, “Effects of Shade Nets on Microclimatic Conditions, Growth, Fruit Yield, and Quality of Eggplant (*Solanum melongena* L.): A Case Study in Carnarvon, Western Australia,” *Horticulturae*, vol. 8, no. 8, 2022, doi: 10.3390/horticulturae8080696.
- [32] T. Setyorini et al., “Mustard (*Brassica rapa*) and Eggplant (*Solanum melongena*) Cultivation in Agrivoltaic System in Coastal Area, Case Study of Baron Technopark, Yogyakarta,” *J. Agron. Tanam. Trop.*, vol. 6, no. 2, 2024, doi: 10.36378/juatika.v6i2.3570.
- [33] A. A. Reeza, N. F. M. Noor, O. H. Ahmed, and M. A. Masuri, “Shading Effect of Photovoltaic Panels on Growth of Selected Tropical Vegetable Crops,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 324, no. October 2023, p. 112574, 2024, doi: 10.1016/j.scienta.2023.112574.
- [34] S. H. Chae, H. J. Kim, H. W. Moon, Y. H. Kim, and K. M. Ku, “Agrivoltaic Systems Enhance Farmers’ Profits through Broccoli Visual Quality and Electricity Production without Dramatic Changes in Yield, Antioxidant Capacity, and Glucosinolates,” *Agronomy*, vol. 12, no. 6, p. 1415, Jun. 2022, doi: 10.3390/AGRONOMY12061415/S1.
- [35] L. F. S. Greg A. Barron-Gafford, Mitchell A. Pavao-Zuckerman, Rebecca L. Minor, K. D. Isaiah Barnett-Moreno, Daniel T. Blackett, Moses Thompson, A. K. Gerlak, and G. P. N. and J. E. Macknick, “Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands,” *Nat. Sustain.*, 2019.

- [36] T. Sekiyama and A. Nagashima, “Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop,” doi: 10.3390/environments6060065.
- [37] R. A. Gonocruz et al., “Analysis of the Rice Yield under an Agrivoltaic System: A Case Study in Japan,” *Environ.* 2021, Vol. 8, Page 65, vol. 8, no. 7, p. 65, Jul. 2021, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS8070065.
- [38] B. Valle et al., “Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops,” *Appl. Energy*, vol. 206, pp. 1495–1507, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.09.113.
- [39] A. Carreño-Ortega et al., “Lettuce Production under Mini-PV Modules Arranged in Patterned Designs,” *Agron.* 2021, Vol. 11, Page 2554, vol. 11, no. 12, p. 2554, Dec. 2021, doi: 10.3390/AGRONOMY11122554.
- [40] I. A. Ramos-Fuentes, Y. Elamri, B. Cheviron, C. Dejean, G. Belaud, and D. Fumey, “Effects of shade and deficit irrigation on maize growth and development in fixed and dynamic AgriVoltaic systems,” *Agric. Water Manag.*, vol. 280, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.AGWAT.2023.108187.
- [41] E. Hassanpour, A. Id, J. S. Selker, and C. W. Higgins, “Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency,” 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0203256.
- [42] S. Jiang et al., “Effects of different photovoltaic shading levels on kiwifruit growth, yield and water productivity under ‘agrivoltaic’ system in Southwest China,” *Agric. Water Manag.*, vol. 269, p. 107675, 2022, doi: 10.1016/j.agwat.2022.107675.
- [43] H. Marrou, L. Dufour, and J. Wery, “How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system?,” *Eur. J. Agron.*, vol. 50, pp. 38–51, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.EJA.2013.05.004.
- [44] C. Wu et al., “Ecohydrological effects of photovoltaic solar farms on soil microclimates and moisture regimes in arid Northwest China: A modeling study,” *Sci. Total Environ.*, vol. 802, p. 149946, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.149946.
- [45] M. Zotti et al., “Testing the effect of semi-transparent spectrally selective thin film photovoltaics for agrivoltaic application: A multi-experimental and multi-specific approach,” *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e26323, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.HELİYON.2024.E26323.
- [46] N. Gnayem et al., “Examining the effect of different photovoltaic modules on cucumber crops in a greenhouse agrivoltaic system: A case study,” *Biosyst. Eng.*, vol. 241, pp. 83–94, May 2024, doi: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2024.03.012.

- [47] F. Johansson, B. E. Gustafsson, B. Stridh, and P. E. Campana, "3D-thermal modelling of a bifacial agrivoltaic system: a photovoltaic module perspective," *Energy Nexus*, vol. 5, p. 100052, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.NEXUS.2022.100052.
- [48] O. A. Katsikogiannis, H. Ziar, and O. Isabella, "Integration of bifacial photovoltaics in agrivoltaic systems: A synergistic design approach," *Appl. Energy*, vol. 309, p. 118475, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.118475.
- [49] H. Imran and M. H. Riaz, "Investigating the potential of east/west vertical bifacial photovoltaic farm for agrivoltaic systems," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 13, no. 3, May 2021, doi: 10.1063/5.0054085/285075.
- [50] E. K. Grubbs et al., "Optimized agrivoltaic tracking for nearly-full commodity crop and energy production," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 191, p. 114018, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2023.114018.
- [51] D. Panico, P. Garvison, H. Wenger, and D. Shugar, "Backtracking: A novel strategy for tracking PV systems," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, vol. 1, pp. 668–673, 1992, doi: 10.1109/PVSC.1991.169294.
- [52] F. J. Casares de la Torre, M. Varo-Martinez, R. López-Luque, J. Ramírez-Faz, and L. M. Fernández-Ahumada, "Design and analysis of a tracking / backtracking strategy for PV plants with horizontal trackers after their conversion to agrivoltaic plants," *Renew. Energy*, vol. 187, pp. 537–550, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2022.01.081.
- [53] D. Wang and Y. Sun, "Optimizing Light Environment of the Oblique Single-axis Tracking Agrivoltaic System," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 170, no. 4, Jul. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/170/4/042069.
- [54] B. Willockx, C. Lavaert, and J. Cappelle, "Performance evaluation of vertical bifacial and single-axis tracked agrivoltaic systems on arable land," 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119181.
- [55] N. F. Othman et al., "Solar Pv Cooling Approaches with Agrivoltaic Natural Cooling in Large Scale Solar Pv Farms," *SSRN Electron. J.*, Nov. 2022, doi: 10.2139/SSRN.4266665.
- [56] J. W. C. Teng, C. B. Soh, S. C. Devihosur, R. H. S. Tay, and S. K. Jusuf, "Effects of Agrivoltaic Systems on the Surrounding Rooftop Microclimate," *Sustain.* 2022, Vol. 14, Page 7089, vol. 14, no. 12, p. 7089, Jun. 2022, doi: 10.3390/SU14127089.
- [57] H. J. Williams, K. Hashad, H. Wang, and K. Max Zhang, "The potential for agrivoltaics to enhance solar farm cooling," *Appl. Energy*, vol. 332, p. 120478, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.120478.

- [58] S. Schindele et al., “Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications,” *Appl. Energy*, vol. 265, May 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.114737.
- [59] S. Parkinson and J. Hunt, “Economic Potential for Rainfed Agrivoltaics in Groundwater-Stressed Regions,” *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 7, pp. 525–531, Jul. 2020, doi: 10.1021/ACS.ESTLETT.0C00349/ASSET/IMAGES/MEDIUM/EZ0C00349_0004.GIF.
- [60] A. Agostini, M. Colauzzi, and S. Amaducci, “Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment,” *Appl. Energy*, vol. 281, p. 116102, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.116102.
- [61] A. Feuerbacher, T. Herrmann, S. Neuenfeldt, M. Laub, and A. Gocht, “Estimating the economics and adoption potential of agrivoltaics in Germany using a farm-level bottom-up approach,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 168, p. 112784, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112784.
- [62] M. Sojib Ahmed, M. Rezwan Khan, A. Haque, and M. Ryyan Khan, “Agrivoltaics analysis in a techno-economic framework: Understanding why agrivoltaics on rice will always be profitable,” *Appl. Energy*, vol. 323, p. 119560, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.119560.
- [63] B. M. Grau, “Agrivoltaic – Current developments and a case study for permanent crops in Switzerland,” no. March, 2022.
- [64] G. Di Francia and P. Cupo, “A Cost–Benefit Analysis for Utility-Scale Agrivoltaic Implementation in Italy,” *Energies* 2023, Vol. 16, Page 2991, vol. 16, no. 7, p. 2991, Mar. 2023, doi: 10.3390/EN16072991.
- [65] M. Trommsdorff, M. Hopf, O. Hörnle, M. Berwind, S. Schindele, and K. Wydra, “Can synergies in agriculture through an integration of solar energy reduce the cost of agrivoltaics? An economic analysis in apple farming,” *Appl. Energy*, vol. 350, p. 121619, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.APENERGY.2023.121619.
- [66] A. Ravilla, G. Shirkey, J. Chen, M. Jarchow, O. Stary, and I. Celik, “Techno-economic and life cycle assessment of agrivoltaic system (AVS) designs,” *Sci. Total Environ.*, vol. 912, p. 169274, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.169274.
- [67] P. E. Campana et al., “Experimental results, integrated model validation, and economic aspects of agrivoltaic systems at northern latitudes,” *J. Clean. Prod.*, vol. 437, p. 140235, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.140235.
- [68] SADER, “Regiones agroalimentarias de México,” 2021. [https://www.gob.mx/agricultura/articulos/114943?tab=.](https://www.gob.mx/agricultura/articulos/114943?tab=)
- [69] P. D. C. D. E. D. B. CALIFORNIA, Comisión de energía y recursos hidráulicos dictamen no. 1, no. 1. CALIFORNIA, PRESIDENCIA DEL CONGRESO DEL ESTADO DE BAJA, 2018.

- [70] CFE, “Nuestra Empresa: Historia de la CFE.” <https://www.cfe.mx/nuestraempresa/Pages/historia.aspx> (accessed May 26, 2024).
- [71] CFE, “Nuestra Empresa: ¿Qué es la CFE?” <https://www.cfe.mx/nuestraempresa/Pages/queeslacfe.aspx> (accessed May 26, 2024).
- [72] Secretaría de Energía, “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024-2038,” 2025. <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2024-2038>.
- [73] CFE and J. Agredano Díaz, “Insumos de Energía Renovable Fotovoltaica y su Proyección al 2020,” pp. 5–6, 2020.
- [74] Secretaría de Energía, “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037,” 2023.
- [75] SOLARGIS, “Solar resource maps of Mexico,” 2021. <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=mexico> (accessed Feb. 17, 2025).
- [76] SENER, “Programa del Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional,” 2022.
- [77] Secretaría de Relaciones Exteriores, “En el marco de su participación en la COP27, el canciller presentó los compromisos de México para hacerle frente al cambio climático,” 2022. <https://www.gob.mx/sre/articulos/en-el-marco-de-su-participacion-en-la-cop27-el-canciller-presento-los-compromisos-de-mexico-para-hacerle-frente-al-cambio-climatico?idiom=es> (accessed Feb. 17, 2025).
- [78] E. Villanueva et al., “Iniciativa Solar para el impulso de la energía solar fotovoltaica de gran escala,” pp. 1–38, 2021.
- [79] DOF - Diario Oficial de la Federación, “ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética,” 2020. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020#gsc.tab=0 (accessed May 21, 2024).
- [80] Y. Ordaz, “Lanzan proyecto para aplicar energía agrovoltaica en México - Grupo Milenio,” Ciudad de México, 2023.
- [81] SOLAREVER, “Lanzan proyecto para aplicar energía agrovoltaica en México – Solarever.” <https://solarever.com.mx/2023/07/21/lanzan-proyecto-para-aplicar-energia-agrovoltaica-en-mexico/> (accessed May 26, 2024).
- [82] G. Francovich, “IER-UNAM y Solarever presentan un nuevo proyecto para aplicar energía agrovoltaica en México - Energía Estratégica,” Jun. 23, 2023. <https://www.energiaestrategica.com/ier-unam->

y-solarever-presentan-un-nuevo-proyecto-para-aplicar-energia-agrovoltaica-en-mexico/ (accessed May 26, 2024).

[83] J. A. Castro, “UNIVERSITARIOS CREAN PRIMERA PARCELA AGROVOLTAICA EN MÉXICO,” Nov. 06, 2023. <https://www.vertigopolitico.com/columnas/notas/universitarios-crean-primera-parcela-agrovoltaica-en-mexico> (accessed May 26, 2024).

[84] Xinhua, “Parcela agrovoltaica en México: genera energías limpias y alimentos,” Dec. 08, 2023. <https://www.unotv.com/ruta-a-china/un-huerto-solar-en-mexico-parcela-agrovoltaica-genera-energias-limpias-y-alimentos/> (accessed May 26, 2024).

[85] P. Agrovoltaica, “Parcela Agrovoltaica | México.” <https://www.parcelaagrovoltaica.com.mx/> (accessed May 26, 2024).

[86] UNAM, “Instalan la primera parcela agrovoltaica de México ,” Oct. 12, 2023. <https://www.gaceta.unam.mx/instalan-en-la-unam-la-primera-parcela-agrovoltaica-de-mexico/> (accessed May 26, 2024).

[87] Sep, “Programa Nacional de Agrovoltaicos - construcción de una red de IES.” 2023, [Online]. Available: https://www.educacionsuperior.sep.gob.mx/conaces/pdf/7sesion/VIII_Programa_Nacional_de_Agrovoltaicos.pdf.

[88] G. Francovich, “Destacan el éxito de los huertos agrovoltaicos para comunidades originarias en Sonora - Energía Estratégica,” May 26, 2023. <https://www.energiaestrategica.com/destacan-el-exito-de-los-huertos-agrovoltaicos-para-comunidades-originarias-en-sonora/> (accessed May 26, 2024).

[89] Universidad de Sonora, “Proyecto PRONACES No 315254 – Seguridad energética, hídrica y alimentaria para pueblos originarios en regiones costeras semiáridas en el norte de México.” 2021.

[90] CONAHCYT, “Resultados de Pronaii Energía, agua y alimentos: Seguridad para pueblos originarios.” <https://conahcyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/energia/energia-agua-y-alimentos-seguridad-para-pueblos-originarios/resultados/> (accessed May 26, 2024).

[91] J. Zarco, “Agrovoltaica, punto de encuentro entre universitarios de la USEM y la ‘Asociación México Canadá, Aprendiendo Juntos’ ,” Mar. 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/> (accessed May 26, 2024).

[92] J. Zarco, “Chiles serranos y paneles solares. Primeras experiencias entre la agricultura y la fotovoltaica en México ,” Mar. 06, 2023. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/03/06/chiles-serranos-y-paneles-solares-primeras-experiencias-entre-la-agricultura-y-la-fotovoltaica-en-mexico/> (accessed May 26, 2024).

- [93] “Red Agrovoltaica Mexicana.” <https://redagvmx.com/> (accessed May 26, 2024).
- [94] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, “Anuario Estadístico de la Producción Agrícola,” 2023. [Online]. Available: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- [95] K. Leuven, “Agrivoltaics KU Leuven.” <https://iiw.kuleuven.be/apps/agrivoltaics/kpi.html> (accessed Jan. 13, 2025).
- [96] NASA, “NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) | Data Access Viewer (DAV).” <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [97] H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, and C. Dupraz, “Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels,” *Eur. J. Agron.*, vol. 44, pp. 54–66, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.EJA.2012.08.003.
- [98] A. Weselek, A. Bauerle, J. Hartung, S. Zikeli, I. Lewandowski, and P. Högy, “Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate,” doi: 10.1007/s13593-021-00714-y/Published.
- [99] F. I. for S. E. Systems, “Hofgemeinschaft Heggelbach.” <https://www.ise.solar-monitoring.de/system.php?system=apvh&untersystem=0&lang=en> (accessed Sep. 11, 2024).
- [100] M. Kadowaki, A. Yano, F. Ishizu, T. Tanaka, and S. Noda, “Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth,” *Biosyst. Eng.*, vol. 111, no. 3, pp. 290–297, 2012, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.12.006.
- [101] A. Scarano et al., “Effects of the Agrivoltaic System on Crop Production: The Case of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.),” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 7, 2024, doi: 10.3390/app14073095.
- [102] H. A. Al-Agele, K. Proctor, G. Murthy, and C. Higgins, “A Case Study of Tomato (*Solanum lycopersicon* var. Legend) Production and Water Productivity in Agrivoltaic Systems,” 2021, doi: 10.3390/su13052850.
- [103] K. Ezzaeri et al., “Performance of photovoltaic canarian greenhouse: A comparison study between summer and winter seasons,” *Sol. Energy*, vol. 198, no. September 2019, pp. 275–282, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.01.057.
- [104] S. Mohammedi, G. Dragonetti, N. Admane, and A. Fouial, “The Impact of Agrivoltaic Systems on Tomato Crop: A Case Study in Southern Italy,” *Processes*, vol. 11, no. 12, 2023, doi: 10.3390/pr11123370.
- [105] S. Kim, S. Kim, and K. An, “An integrated multi-modeling framework to estimate potential rice and energy production under an agrivoltaic system,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 213, no. June, p. 108157, 2023, doi: 10.1016/j.compag.2023.108157.

- [106] S. Gautam, D. B. Das, and A. K. Saxena, “Economic indicators evaluation to study the feasibility of a solar agriculture farm: A case study,” *Sol. Compass*, vol. 10, p. 100074, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.SOLCOM.2024.100074.
- [107] H. Marrou et al., “Designing farming systems combining food and electricity production,” *Sol. Compass*, vol. 10, no. April, p. 100074, 2024, doi: 10.1016/j.solcom.2024.100074.
- [108] A. Tani, S. Shiina, K. Nakashima, and M. Hayashi, “Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels,” *J. Agric. Meteorol.*, vol. 70, no. 3, pp. 139–149, 2014, doi: 10.2480/agrmet.D-14-00005.
- [109] “Solar energy Colorado | Jack’s Solar Garden, LLC | United States.” <https://www.jackssolargarden.com/> (accessed Oct. 06, 2023).
- [110] C. Sponagel, A. Feuerbacher, D. Bendel, T. Karl, D. Weber, and E. Bahrs, “Economic and Agronomic Impacts of Agrivoltaics on Arable Land Use at the Example of the Stuttgart Region,” *Ger. J. Agric. Econ.*, vol. 72, no. 2, May 2023, doi: 10.30430/GJAE.2023.0334.
- [111] H. Helsen et al., “Crop Response to Agrivoltaics in Soft Fruit Production,” Accessed: Jan. 13, 2025. [Online]. Available: www.sunbiose.nl.
- [112] D. Matulić et al., “Agrivoltaics and Aquavoltaics: Potential of Solar Energy Use in Agriculture and Freshwater Aquaculture in Croatia,” *Agric.*, vol. 13, no. 7, 2023, doi: 10.3390/agriculture13071447.
- [113] G. E. MONITOR, “UNA CARRERA HACIA LA CIMA: AMÉRICA LATINA 2023,” 2023, doi: 10.1088/1748-9326/ab506d.
- [114] CRE, “FACTOR DE EMISIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL 2023,” p. 2024, 2024.
- [115] US EPA, “Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle.” <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle> (accessed Sep. 18, 2024).