

Smart solar-powered hydroponic system based on artificial intelligence as a replicable model for sustainable food development in vulnerable communities

Maria Elizabeth Puelles Bulnes, Dra¹; Rosa Delgadillo, Dra²; Igor Aguilar-Alonso, Dr³; Jorge Luis Inche Mitma, Dr⁴; V.A.A. Espinoza, Dr⁵; Angie L. Atoche Puelles, Mg⁶

^{1,2,3,4}National University of San Marcos, Perú, mpuellesb@unmsm.edu.pe, rdelgadilloa@unmsm.edu.pe, iaguilara@unmsm.edu.pe, jinchem@unmsm.edu.pe; ⁵National University of Callao, Perú, vaatochee@unac.edu.pe; ⁶Federal University of Minas Gerais, Brazil, angie.puelles@gmail.com

*Abstract— This study presents the design, implementation, and pilot experimental evaluation of a compact Nutrient Film Technique (NFT) hydroponic system integrated with photovoltaic solar energy, IoT-based monitoring, and intelligent control, intended for domestic and community applications as well as environments with limited water availability, space, or energy infrastructure. The objective was to preliminarily assess the technical feasibility of a modular and potentially replicable model capable of improving water-use efficiency, energy management, and crop operation through automation and continuous monitoring. As a distinguishing feature, the system incorporates an Intelligent Microgreenhouse Health Indicator (IISM), complemented by a Random Forest machine-learning model for classifying the operational status of the crop and supporting user monitoring and decision-making. A prototype was developed using a Raspberry Pi, environmental and physicochemical sensors, actuators, and an autonomous photovoltaic energy system. The pilot evaluation was conducted over 30 days after transferring six lettuce (*Lactuca sativa*) seedlings, with an initial height of approximately 6–8 cm, into the Microgreenhouse. During this single pilot cycle ($n = 6$), the system achieved an average fresh weight of 280 ± 10 g per plant and a total production of 1.68 kg per cycle, representing a descriptive increase of 16.7% compared with a previous manual reference of 1.44 kg per cycle. Water consumption was 15 L per cycle, compared with 54 L for the manual reference, corresponding to a 72.2% reduction. The energy subsystem operated fully off-grid and achieved 16 h of autonomy without photovoltaic input. The Random Forest model achieved an overall accuracy of 91.2%, with a Precision of 0.9047, Recall of 0.8996, and F1-score of 0.9018 for operational-state classification. During intelligent system operation, manual intervention was also reduced by 55%. These results should be interpreted as preliminary due to the limited sample size, the use of a single experimental cycle, and the fact that the manual comparison corresponded to a non-concurrent historical reference.*

It is concluded that the integration of NFT hydroponics, solar energy, IoT, and artificial intelligence represents a technically viable alternative for developing compact and sustainable food-production systems for domestic and community settings, particularly in contexts with constraints related to space, water availability, or energy infrastructure.

Keywords— Hydroponics, Internet of Things (IoT), Solar Energy, Sustainable Agriculture, Artificial Intelligence, Random Forest.

Sistema Hidropónico solar Inteligente basado en Inteligencia Artificial como modelo replicable para el Desarrollo Alimentario Sostenible en Comunidades Vulnerables

Maria Elizabeth Puelles Bulnes, Dra¹; Rosa Delgadillo, Dra²; Igor Aguilar-Alonso, Dr³; Jorge Luis Inche Mitma, Dr⁴; V.A.A. Espinoza, Dr⁵; Angie L. Atoche Puelles, Mg⁶
^{1,2,3,4}Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, mpuellesb@unmsm.edu.pe, rdelgadilloa@unmsm.edu.pe, iaguilara@unmsm.edu.pe, jinchem@unmsm.edu.pe; ⁵Universidad Nacional del Callao, Perú, vaatochee@unac.edu.pe; ⁶Universidade Federal Minas Gerais, Brasil, angie.puelles@gmail.com

Resumen - Este estudio presenta el diseño, implementación y evaluación experimental piloto de un sistema hidropónico compacto tipo NFT (Nutrient Film Technique), integrado con energía solar fotovoltaica, monitoreo IoT y control inteligente, orientado a aplicaciones domésticas, comunitarias y contextos con limitaciones de agua, espacio o infraestructura energética. El objetivo fue evaluar preliminarmente la viabilidad técnica de un modelo modular y potencialmente replicable capaz de mejorar la eficiencia en el uso de agua, energía y operación del cultivo mediante automatización y monitoreo continuo. Como elemento diferenciador, el sistema incorpora un Indicador Inteligente de Salud del Microinvernadero (IISM), complementado por un modelo de aprendizaje automático Random Forest para clasificar el estado operativo del cultivo y apoyar el monitoreo y la toma de decisiones del usuario. Se desarrolló un prototipo basado en Raspberry Pi, sensores ambientales y fisicoquímicos, actuadores y un sistema fotovoltaico autónomo. La evaluación se realizó durante 30 días posteriores al ingreso al microinvernadero de seis plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) con una altura inicial aproximada de 6–8 cm. En este ciclo piloto único (n=6), el sistema alcanzó una producción promedio de 280 ± 10 g por planta y 1.68 kg por ciclo, equivalente a un incremento descriptivo de 16.7 % respecto de una referencia manual previa de 1.44 kg por ciclo. El consumo hídrico fue de 15 L por ciclo frente a 54 L en la referencia manual, representando una reducción de 72.2 %. El sistema energético operó de forma completamente off-grid, alcanzando una autonomía sin aporte fotovoltaico de 16 horas. El modelo Random Forest alcanzó una exactitud global (Accuracy) de 91.2 %, con una Precisión de 0.9047, Recall de 0.8996 y F1-score de 0.9018 en la clasificación del estado operativo del microinvernadero. Durante la operación del sistema inteligente se observó además una reducción del 55 % en la intervención manual. Los resultados deben interpretarse como preliminares debido al tamaño muestral limitado, al uso de un único ciclo experimental y a que la comparación manual correspondió a una referencia histórica no concurrente.

Se concluye que la integración de hidroponía NFT, energía solar, IoT e inteligencia artificial constituye una alternativa técnicamente viable para el desarrollo de sistemas compactos de producción sostenible de alimentos en entornos domésticos y comunitarios, especialmente en contextos con restricciones de espacio, agua o infraestructura energética.

Palabras clave-- Hidroponía, Internet de las Cosas (IoT), Energía Solar, Agricultura sostenible, Inteligencia Artificial.

I. Introducción

A. Sistemas hidropónicos y sostenibilidad alimentaria

La inseguridad alimentaria en América Latina enfrenta una crisis alimentaria crítica, más de 49 millones de personas padecen hambre [1], situación agravada por el cambio climático, la crisis postpandemia y las fallas en las cadenas de suministro. Este escenario perpetúa ciclos de pobreza en comunidades vulnerables al limitar su acceso a nutrición básica. Por su parte, la agricultura convencional resulta inviable en estos contextos debido a barreras estructurales como la degradación de suelos, la escasez hídrica y la dependencia de insumos costosos [2]-[4]. Esta incapacidad de adaptación ante la volatilidad climática compromete la estabilidad productiva de quienes poseen menos recursos [5],[6].

Ante este escenario, la hidroponía emerge como una alternativa sostenible por su alta eficiencia hídrica y su capacidad de producir en espacios reducidos o suelos marginales [7]. Al prescindir de tierra cultivable y permitir un control preciso de nutrientes, la hidroponía multiplica las posibilidades productivas en entornos donde el suelo es un bien escaso, como zonas urbanas o con superficies degradadas [8]. Un metaanálisis global de 499 observaciones respalda la hidroponía como una vía de intensificación sostenible, concluyendo que los rendimientos en ambientes controlados superan consistentemente a la agricultura tradicional en hortalizas frescas. No obstante, el estudio subraya que la eficiencia varía según el tipo de cultivo y la orientación del sistema, destacando la necesidad de optimizar los entornos productivos para maximizar resultados [9].

De igual manera, el cultivo hidropónico en el hogar se consolida como una estrategia fundamental de agricultura familiar y urbana, actuando como una herramienta clave para la resiliencia alimentaria. Este enfoque permite a las comunidades vulnerables transformar sus propios espacios en sistemas productivos sostenibles que minimizan el gasto de recursos hídricos y fortalecen la seguridad alimentaria local. Al aprovechar los recursos y la mano de obra familiar, estos sistemas empoderan a los hogares, incrementando su capacidad de adaptación frente a la volatilidad climática y garantizando una gestión autónoma de su propia nutrición [10]. Sin embargo, su implementación de estos sistemas exige una supervisión constante de parámetros como el pH y la conductividad eléctrica (CE). Estas exigencias técnicas, sumadas a la falta de sistemas adaptados a espacios domésticos no convencionales,

actúan como barreras de adopción en comunidades con acceso restringido a formación o tecnología [11]. Ante esto, investigaciones recientes sugieren que la automatización mediante sensores simples y sistemas modulares de bajo costo puede reducir estas brechas, que esta tecnología sea accesible y funcional sin requerir infraestructuras complejas [12]-[15]. A esto se suma la necesidad de integrar interfaces de comunicación inteligente que funcionen como un indicador de salud del cultivo; mediante alertas en tiempo real y simplificadas, el sistema guía al usuario en la gestión de agua y nutrientes, permitiendo que la tecnología asuma la complejidad técnica. Así, se garantiza la eficiencia operativa sin exigir al usuario conocimientos previos en tecnología o agronomía.

B. Inteligencia artificial en agricultura inteligente

En este escenario, la Inteligencia Artificial (IA) y la agricultura de precisión emergen como catalizadoras de una nueva generación de sistemas hidropónicos. Mediante algoritmos de aprendizaje automático, es posible optimizar en tiempo real variables críticas como el pH, la conductividad eléctrica y los ciclos de iluminación, anticipándose a desequilibrios que afecten el cultivo [16]. La evidencia experimental demuestra que la automatización no solo acelera el ciclo productivo y mejora la uniformidad del crecimiento, sino que optimiza el uso de fertilizantes y reduce errores humanos, validando la viabilidad de sistemas domésticos para la producción local en contextos urbanos [17].

Para garantizar la replicabilidad en comunidades con infraestructura deficitaria, la integración de energía solar fotovoltaica confiere a estas instalaciones una autonomía fundamental. La combinación de generación renovable y sistemas de almacenamiento permite que sensores, bombas y unidades de control operen de manera continua, desacoplando la producción alimentaria de la inestabilidad de la red eléctrica convencional [18]. Esta sinergia tecnológica permite alcanzar eficiencias hídricas de hasta un 90% superior a la agricultura tradicional, consolidando a la hidroponía de precisión como una herramienta de alta eficiencia y bajo mantenimiento [8].

No obstante, persiste un desafío estructural crítico: la mayoría de estas soluciones inteligentes están diseñadas para la escala industrial, con altos costos y dependencia de infraestructuras complejas. Existe una brecha significativa en el diseño de sistemas que sean realmente accesibles y de bajo costo. Por ello, el desarrollo tecnológico debe trascender la eficiencia técnica para incorporar principios de justicia social y diseño participativo [19]; solo mediante soluciones contextualizadas y de fácil apropiación comunitaria, la tecnología podrá convertirse en una verdadera herramienta de transformación social en entornos vulnerables.

C. Sistemas Inteligentes y Autonomía Energética

La agricultura inteligente ha evolucionado mediante la integración de técnicas de IA y el Internet de las Cosas (IoT) para maximizar el rendimiento de los cultivos. Investigaciones recientes demuestran que el uso de algoritmos de Machine Learning, como el modelo Random Forest, permite alcanzar precisiones superiores al 98% en la predicción de cosechas y

gestión de nutrientes [16],[20]. Asimismo, la implementación de sensores conectados a plataformas en la nube (AWS) y aplicaciones móviles ha validado la posibilidad de reducir drásticamente la intervención humana mediante el control remoto en tiempo real de variables como el pH y la conductividad eléctrica [21]. Estas tecnologías, apoyadas en redes de comunicación de bajo consumo como LoRaWAN, no solo optimizan el uso de agua y agroquímicos (tecnología VRT), sino que fortalecen la seguridad alimentaria al permitir anticipar la producción y demanda mediante modelos de series de tiempo [22], [23]. Sin embargo, la eficiencia técnica de estos sistemas no garantiza su viabilidad en contextos de vulnerabilidad social si no se resuelve la dependencia de la infraestructura energética convencional. La integración de sistemas fotovoltaicos *off-grid* surge como una solución fundamental para dotar de autonomía operativa a sensores y bombas en zonas con acceso limitado a la red eléctrica. Experiencias en comunidades rurales y asentamientos vulnerables demuestran que la energía solar es técnica y económicamente viable cuando se acompaña de un diseño centrado en la resiliencia y la formación local [24],[25]. Desde la perspectiva de la ingeniería humanitaria, el éxito de estas intervenciones depende de diagnósticos participativos y de una transferencia tecnológica que asegure la apropiación comunitaria y la sostenibilidad a largo plazo [26],[27].

A pesar de estos avances, la literatura evidencia un vacío en el desarrollo de modelos que integren de manera explícita la hidroponía, la inteligencia artificial y la autonomía energética bajo un enfoque de replicabilidad para comunidades domésticas. La mayoría de las soluciones de precisión actuales son difícilmente transferibles debido a sus altos costos y complejidad operativa [28].

El presente trabajo se enmarca en una línea de investigación del equipo sobre hidroponía automatizada doméstica desarrollada a partir del 2020, cuyos resultados se han publicado progresivamente: un prototipo inicial de invernadero NFT con control de dos microclimas [13], su evolución hacia un invernadero automatizado orientado a la nutrición familiar con distintas variedades de cultivo [14], y su extensión a un modelo de agricultura urbana tipo minihuerto [15]. El presente estudio constituye la siguiente etapa de esta línea de investigación, incorporando por primera vez la integración conjunta de autonomía energética fotovoltaica completa (100% off-grid) y un modelo de inteligencia artificial (Random Forest) para la clasificación automática del estado operativo del cultivo mediante el Indicador Inteligente de Salud del Microinvernadero (IISM), elementos no presentes en los desarrollos previos del grupo.

El presente estudio se enmarca en la intersección entre la innovación tecnológica y la soberanía alimentaria urbana. Se propone diseñar, implementar y evaluar un sistema hidropónico solar inteligente basado en IA, concebido como un modelo replicable para familias en contextos domésticos urbanos. El objetivo central es trasladar la capacidad productiva del campo al entorno residencial, superando las barreras del espacio

limitado y la falta de tiempo. Mediante la automatización y el uso de energía renovable, se busca que cualquier hogar, independientemente de su acceso a tierra o conocimientos agrícolas, pueda gestionar un ciclo de cultivo eficiente, convirtiendo la vivienda en un nodo de producción sostenible y resiliente en América Latina. La investigación no se limita a los aspectos técnicos, sino que integra las condiciones sociales, económicas y formativas que permitirían su adopción efectiva y escalable. De esta forma, se contribuye tanto al acervo de conocimiento sobre aplicaciones de IA en agricultura urbana como a la generación de herramientas concretas para enfrentar el desafío ético y social de nuestro tiempo: garantizar el derecho a la alimentación para todas las personas, independientemente de su lugar de origen o condición socioeconómica.

II. Metodología

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo aplicada, cuantitativa y experimental, desarrollado mediante la implementación y evaluación piloto de un sistema hidropónico compacto integrado con energía solar, monitoreo IoT e inteligencia artificial. A continuación, se presenta la descripción y definición de los dispositivos e instrumentos utilizados en este trabajo.

A. Diseño de Variables

1. Variable Independiente

Sistema hidropónico inteligente automatizado, basado en tecnologías de monitoreo, control y autonomía energética para la gestión del microinvernadero.

2. Variable Dependiente

Desempeño del sistema hidropónico, evaluado mediante indicadores productivos, fisicoquímicos, energéticos y de eficiencia operativa.

B. Arquitectura del Sistema (Hardware)

La arquitectura se divide en tres capas funcionales que permiten el control en lazo cerrado: Entrada (Sensado), Procesamiento y Salida (Actuación).

1. Unidad Central de Procesamiento

Raspberry Pi 4: El núcleo de control del sistema hidropónico es una Raspberry Pi 4, seleccionada por su arquitectura de ordenador de placa reducida que integra un procesador (CPU), memoria RAM y amplias capacidades de conectividad (USB, Ethernet, WiFi y Bluetooth). Su elección se fundamenta en su capacidad para ejecutar tareas de alta carga computacional en un formato compacto y eficiente. Se encarga de la lectura de sensores, ejecución de algoritmos de control en Python, gestión de la base de datos y conectividad web. Su capacidad de procesamiento permite la futura integración de modelos de Inteligencia Artificial (IA) y la conexión con una plataforma web para supervisión remota, ver Fig.1:



Fig. 1 Raspberry Pi 4. Adaptado de RedesZone por Sergio De Luz, 2019.

2. Capa de Sensado (Monitoreo de Variables)

Para la adquisición de datos se seleccionaron instrumentos de alta precisión:

a. *Sensor de temperatura (MCP 9808)*: Para la monitorización del microclima interno, se seleccionó el mencionado sensor, debido a su alta precisión y estabilidad en la medición de temperatura ($\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ en el rango típico de operación). Este dispositivo incorpora un convertidor analógico-digital de alta resolución (hasta 16 bits), proporcionando datos confiables a través de una interfaz de comunicación I2C, lo que permite una integración eficiente con la Raspberry Pi y la conexión de múltiples dispositivos en el mismo bus, optimizando el uso de pines GPIO.

Su implementación es fundamental para la estabilidad del sistema por las siguientes razones:

- *Control de Stress*: Permite la activación automatizada de ventiladores y actuadores térmicos para mantener el cultivo dentro de rangos fisiológicos óptimos.
- *Prevención de Condiciones Adversas*: Facilita la detección precisa de variaciones de temperatura que, en conjunto con otros sensores (como humedad), contribuyen al análisis del punto de rocío y a la anticipación de condiciones favorables para la proliferación de patógenos.
- *Eficiencia Energética y Precisión*

a. *Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22 (AM2302)*: Para el monitoreo del microclima interno del microinvernadero se utilizó un sensor digital DHT22 (AM2302), encargado de registrar de manera conjunta la temperatura ambiental y la humedad relativa. Estas variables fueron adquiridas automáticamente por la unidad de procesamiento y almacenadas como parte de la base de datos generada durante los 30 días del estudio piloto. La información obtenida permitió supervisar las condiciones ambientales del cultivo y apoyar la activación del sistema de ventilación cuando se detectaron desviaciones respecto de los rangos establecidos de operación, ver Fig.2.



Fig. 2 Temperatura ambiental y humedad relativa

b. *Sensor de temperatura sumergible DS18B20*: Se utilizó el sensor digital DS18B20 (IP68) con protocolo 1-Wire para el monitoreo térmico de la solución nutritiva (Precisión: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). Su importancia radica en la Ley de Henry, que establece que la solubilidad del oxígeno disminuye al aumentar la temperatura. El dispositivo permite prevenir la hipoxia radicular y la proliferación de patógenos, garantizando que el sistema opere en el rango óptimo ($18-22^{\circ}\text{C}$) para maximizar la absorción de nutrientes y la eficiencia fisiológica del cultivo, ver Fig.3:

Pin Configurations

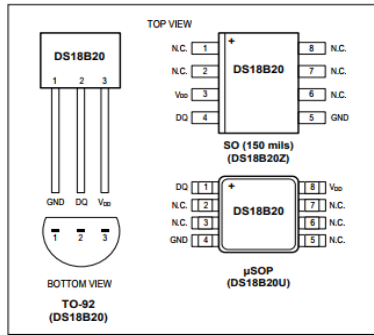


Fig. 3. Sensor de Temperatura Sumergible DS18B20. Adaptado de DS18B20, Luis del Valle Hernández, s.f.,

c. *Sonda de pH 4502c*: Es un sensor ampliamente utilizado en proyectos de monitoreo de calidad de agua, especialmente en sistemas hidropónicos, debido a que mide la concentración de iones de hidrógeno mediante un electrodo de referencia y uno de vidrio, permitiendo ajustar la solución nutritiva antes del ingreso al sistema, ver Fig.4.



Fig. 4 Sonda Ph 4502c

La Ph 4502C es una sonda electroquímica diseñada para medir el nivel de acidez o alcalinidad (pH) de una solución líquida. Funciona mediante un electrodo de vidrio sensible al ion hidrógeno (H⁺), que genera una señal de voltaje proporcional al pH de la solución.

d. *Sensor de conductividad eléctrica (CE)*: Se utilizó un sensor de conductividad eléctrica para monitorear la concentración iónica de la solución nutritiva. Las mediciones de CE fueron registradas automáticamente y utilizadas para verificar que la solución permaneciera dentro del intervalo operativo establecido para el cultivo de lechuga. Estas mediciones también formaron parte del conjunto de datos utilizado por el modelo Random Forest para la clasificación del estado operativo del microinvernadero.

3. Capa de Actuación y Control

Módulo Relé de Estado Sólido (SSR) de 4 Canales: A diferencia de los relés mecánicos, estos permiten una conmutación rápida, silenciosa y sin desgaste físico. Controlan la bomba de agua, iluminación LED de espectro completo, ventiladores de termostatación y electroválvulas, ver Fig 5:



Fig. 5. Módulo Relé de Estado Sólido de 4 Canales

C. Sistema de Autonomía Energética (Solar Off-Grid)

1. *Fundamentos de la Generación Fotovoltaica*: Para garantizar la operación continua del microinvernadero en entornos domésticos y contextos con acceso limitado o inestable a la red eléctrica, se seleccionó el uso de paneles solares fotovoltaicos, los cuales convierten la radiación solar directamente en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, ver Fig. 6.

La eficiencia del sistema depende de la estructura del material semiconductor empleado, clasificándose principalmente en tres tipos de tecnología de silicio:

a. *Silicio Monocristalino*: Fabricado a partir de un único cristal de alta pureza. Presenta un mayor rendimiento energético y eficiencia por unidad de área.

b. *Silicio Policristalino*: Constituido por múltiples cristales de silicio. Presenta un coste de fabricación menor, aunque su eficiencia es ligeramente inferior a la del monocristalino debido a las impurezas en las uniones de los cristales.

c. *Silicio Amorfo*: Carece de estructura cristalina definida. Aunque posee el menor rendimiento, destaca por su capacidad de generar pequeñas cantidades de energía bajo condiciones de radiación no perpendicular o luz difusa.

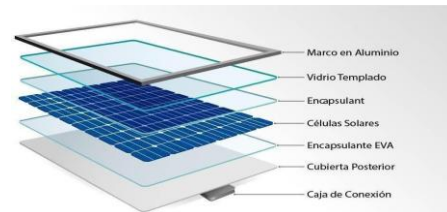


Fig.6. Adaptado de. Panel solar por Ineldec, s.f.

Para el prototipo implementado, se seleccionó la tecnología monocristalina debido a su mayor densidad energética y adecuación para aplicaciones domésticas.

2. Dimensión Energético

El dimensionamiento energético del panel se estimó considerando el consumo diario del sistema y las Horas Sol Pico (HSP) de la región:

$$P_{panel} = \frac{E_{diaria}}{HSP} \quad \dots (1)$$

Donde:

P_{panel}: potencia requerida del panel (W)

E_{diaria}: demanda energética diaria del sistema (Wh/día)

HSP: horas sol pico del lugar (h)

3. Gestión Energética

El sistema incorpora un controlador de carga encargado de regular el flujo energético entre el panel fotovoltaico y el sistema de almacenamiento, ver Fig. 6. Funciones principales:

a. *Regulación de Carga*: Controla la intensidad de entrada para evitar sobrecargas que puedan comprometer la estabilidad química de la batería.

b. *Protección contra Descarga Profunda*: Desconecta automáticamente las cargas (actuadores y sistema embebido) si el voltaje de la batería cae por debajo de un umbral crítico, asegurando su operatividad a largo plazo.

c. **Compensación de Voltaje:** Estabiliza las fluctuaciones provenientes del panel solar causadas por variaciones en la radiación incidente, protegiendo los circuitos de control.



Fig. 6. Controlador de Carga Solar. Adaptado de. Panel solar por Ineldec, s.f.

4. Almacenamiento y Conversión de Energía

Para asegurar la continuidad operativa durante periodos de baja o nula radiación solar (noche o días nublados), el sistema integra un banco de almacenamiento y una etapa de regulación de voltaje (Ver Figura 10):

a. **Batería de $LiFePO_4$:** Seleccionada por alta eficiencia energética, vida útil superior (2000–4000 ciclos) y capacidad de descarga profunda (hasta el 90%), superando las limitaciones de peso y durabilidad de las baterías de plomo-ácido. Su función es estabilizar el suministro para el sistema embebido y cubrir los picos de demanda de los actuadores (bombas y luces LED).

b. **Convertidor DC-DC (Step-Down):** Con el fin de proteger la electrónica sensible, se implementó un regulador con eficiencia del 85-95%. Este módulo reduce los 12V de la batería a niveles estables de 5V para la Raspberry Pi y 3.3V para la red de sensores (pH, AM2302, etc.), garantizando una alimentación libre de fluctuaciones.

5. Evaluación del consumo energético

El consumo energético diario del sistema se determinó considerando tanto las cargas de operación continua, incluido el módulo de radiación ultravioleta instalado en el circuito de recirculación, como las cargas accionadas de forma automática durante el ciclo piloto, entre ellas la bomba de recirculación, los ventiladores, la iluminación LED y la electroválvula.

D. Indicador Inteligente de Salud del Microinvernadero (IISM)

Como aporte a la interfaz de usuario, se diseñó un IISM, un panel visual que sintetiza múltiples variables operativas en un índice porcentual único para facilitar la interpretación del estado del cultivo.

1. Lógica de Evaluación: Utiliza una escala semaforizada basada en algoritmos de ponderación:

- Óptimo (80–100%): Iconografía feliz; condiciones ideales.
- Advertencia (50–79%): Iconografía neutra; requiere ajustes menores.
- Crítico (<50%): Iconografía triste; activa protocolos de intervención automática.

2. Integración con el Sistema

El IISM se integra con la Raspberry Pi y el módulo de relés para convertir el estado calculado del cultivo en acciones automáticas de control. Cuando el índice detecta una desviación respecto a los rangos óptimos, el sistema puede activar o desactivar los actuadores asociados al manejo hídrico, térmico y lumínico del microinvernadero. De esta manera, el indicador permite:

- Activación de la bomba de agua:** mantiene la recirculación de la solución nutritiva en el sistema NFT.
- Control del ventilador:** regula la temperatura y humedad interna del microinvernadero.
- Control de iluminación LED:** complementa la radiación disponible cuando las condiciones lumínicas son insuficientes.
- Activación de electroválvula:** permite regular el ingreso o reposición de agua y solución nutritiva.
- Emisión de alertas:** informa al usuario cuando el sistema entra en estado de advertencia o crítico.

El monitoreo de pH y CE se realizó de manera automática mediante los sensores integrados al sistema. Sin embargo, durante esta etapa piloto, las desviaciones detectadas en estos parámetros fueron utilizadas principalmente para generar alertas y apoyar la toma de decisiones del operador, mientras que los ajustes de la solución nutritiva se efectuaron manualmente cuando fue necesario. Por tanto, el sistema automatizó la supervisión de pH y CE, pero no incorporó en esta fase bombas dosificadoras para su corrección automática.

3. Modelo de Agregación e Integración con Random Forest

El IISM se calcula como un índice normalizado entre 0 y 100, construido a partir de la integración de las principales variables ambientales y fisicoquímicas monitoreadas por el sistema. Para ello, cada variable se compara con su respectivo rango óptimo de operación y se transforma en un puntaje normalizado S_i , donde los valores más altos representan condiciones más próximas al rango adecuado para el cultivo.

Las variables consideradas para el cálculo del indicador son:

- pH de la solución nutritiva
- Conductividad eléctrica (CE);
- Temperatura de la solución nutritiva;
- Temperatura ambiental;
- Humedad relativa;
- Radiación o intensidad lumínica.

El cálculo general del índice puede representarse como una ponderación multicriterio:

$$IISM = \sum_{i=1}^n w_i S_i \quad \dots (2)$$

donde S_i representa el puntaje normalizado de cada variable y w_i el peso asignado según su importancia en el desarrollo del cultivo, sumando igual a 1, siendo una ponderación uniforme para las variables, $w_i = 0.1667$. De forma complementaria, las variables registradas por los sensores son procesadas mediante un modelo de aprendizaje supervisado basado en Random Forest, utilizado para clasificar el estado operativo del microinvernadero en las categorías Óptimo, Advertencia y Crítico. La clasificación generada por el modelo complementa la información proporcionada por el IISM y constituye una capa

de inteligencia adicional para apoyar la toma de decisiones y la activación de los mecanismos de control y alerta implementados en el sistema. La relación funcional entre el monitoreo, el IISM y el modelo de inteligencia artificial se estructura de la siguiente manera:

Sensores → IISM (0–100)

Sensores → Random Forest

IISM + clasificación RF → monitoreo / alertas / actuación

De esta manera, el IISM proporciona una valoración cuantitativa del estado actual del microinvernadero, mientras que el modelo Random Forest constituye una capa complementaria de inteligencia artificial encargada de clasificar su estado operativo. Ambos resultados son utilizados por el sistema para apoyar el monitoreo, la generación de alertas y las acciones de control.

E. Sistema Hidropónico y Funcionalidades Integradas

1. Sistema Hidropónico NFT (Nutrient Film Technique)

El sistema de cultivo implementado corresponde a una configuración hidropónica tipo NFT, en la cual la solución nutritiva circula continuamente formando una lámina delgada (película) sobre el fondo de los canales de cultivo. Este mecanismo permite mantener un suministro constante de agua y nutrientes mientras preserva zonas de aireación para el sistema radicular. El sistema incorpora las siguientes características:

a. Oxigenación Dual: Las raíces obtienen oxígeno tanto del aire presente en la parte superior del canal como del oxígeno disuelto en la solución, optimizado mediante la bomba de aire integrada.

b. Recirculación Continua: El sistema opera bajo un circuito cerrado que maximiza la eficiencia hídrica y permite el ajuste continuo de los parámetros nutricionales antes del retorno de la solución al sistema.

2. Control Biomecánico mediante Actuadores

El sistema hidropónico responde dinámicamente a las condiciones del cultivo mediante mecanismos automáticos de actuación:

a. Termorregulación Activa: Mediante ventiladores se regula la temperatura y humedad interna del microinvernadero para mantener condiciones favorables para el crecimiento vegetal.

b. Desinfección continua del Circuito: Durante el periodo experimental, el sistema incorporó de manera permanente un módulo de radiación ultravioleta instalado en la línea de retorno de la solución nutritiva. Su función fue contribuir al control microbiológico de la solución recirculante durante la operación continua del sistema NFT, reduciendo el riesgo de proliferación de microorganismos en el circuito hidráulico.

3. Optimización del Espacio y Escalabilidad

El diseño físico fue concebido considerando restricciones de espacio típicas del entorno doméstico urbano.

a. Densidad de Siembra: Maximizar el número de plantas por metro cuadrado.

b. Mantenimiento Simplificado: La configuración del sistema facilita el acceso al reservorio, sensores y raíces para inspección y mantenimiento.

c. Escalabilidad Modular: El sistema permite incorporar progresivamente automatización, energía solar y monitoreo según disponibilidad económica.

F. Modelo Inteligente y Monitoreo

1. Modelo de Inteligencia Artificial basado en Random Forest

El sistema implementa un modelo de aprendizaje supervisado basado en Random Forest para clasificar el estado operativo del microinvernadero a partir de datos históricos y mediciones en tiempo real provenientes de los sensores. El modelo recibe como entradas las variables ambientales y fisicoquímicas registradas por el sistema y determina el estado operativo del microinvernadero en tres categorías: Óptimo, Advertencia y Crítico. La clasificación obtenida complementa el Indicador Inteligente de Salud del Microinvernadero (IISM) y apoya la generación de alertas y la toma de decisiones asociadas al control del sistema. Las variables de entrada consideradas fueron temperatura ambiental, humedad relativa, temperatura de la solución nutritiva, pH y conductividad eléctrica (CE) e intensidad lumínica.

2. Conjunto de Datos y Validación

Los datos fueron registrados durante 30 días posteriores al ingreso al microinvernadero de seis plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) con una altura inicial aproximada de 6 cm a 8 cm.

Frecuencia de adquisición:

- cada 10 minutos

División del conjunto:

- entrenamiento: 70 %
- validación: 15 %
- prueba: 15 %

La división del conjunto se realizó de forma secuencial por bloques temporales, asignando los primeros días del ciclo al entrenamiento y validación, y los últimos días —no vistos durante el ajuste del modelo— al conjunto de prueba, con el fin de evitar que registros altamente correlacionados de un mismo intervalo temporal aparecieran simultáneamente en entrenamiento y prueba.

Configuración del modelo:

- algoritmo: Random Forest
- número de árboles: 100
- plataforma: Python + Scikit-learn

Métricas utilizadas:

- Accuracy
- Precision
- Recall
- F1-score

El análisis completo del modelo, incluyendo las cuatro métricas señaladas, se finalizó posteriormente al cierre del ciclo piloto experimental, una vez consolidado el conjunto total de datos registrados durante los 30 días de evaluación.

G. Protocolo Experimental

1. Preparación del cultivo

Antes de iniciar el periodo experimental, las semillas de *Lactuca sativa* fueron germinadas fuera del microinvernadero hasta alcanzar una altura aproximada de 6 cm a 8 cm.

Una vez obtenidas plántulas homogéneas y con crecimiento inicial adecuado, estas fueron transferidas al microinvernadero para iniciar el periodo experimental de 30 días.

La evaluación experimental se realizó durante 30 días posteriores a la transferencia de plántulas al microinvernadero, utilizando lechuga (*Lactuca sativa*) con una altura inicial. El periodo de observación tuvo como objetivo evaluar el desempeño operativo del sistema automatizado durante la fase de crecimiento y adaptación bajo condiciones controladas.

CE: 1.2–2.0 mS/cm

Se calcularon:

- medias
- desviaciones estándar
- porcentajes de mejora
- comparación respecto al sistema manual

1. Integración del sistema y prototipo final

La arquitectura final permitió establecer una comunicación continua entre sensores, unidad de procesamiento, sistema energético y actuadores, posibilitando el monitoreo en tiempo real y la ejecución automática de acciones correctivas sobre las condiciones del cultivo, ver Fig. 7. Se observa que el sistema integra una fuente energética fotovoltaica, almacenamiento eléctrico, procesamiento mediante Raspberry Pi, monitoreo mediante el Indicador IISM y mecanismos de actuación para control hidráulico, térmico y lumínico.

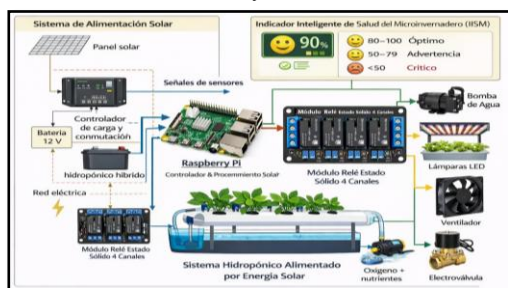


Fig. 7. Esquema de conexión del Sistema hidropónico automatizado con Raspberry Pi

2. Dimensión del Microinvernadero

Como parte de la validación del diseño propuesto, se definieron dimensiones orientadas a aplicaciones domésticas y aprovechamiento eficiente del espacio disponible.

Dimensiones obtenidas:

- Largo total base: 487.50 mm (≈ 48.75 cm)
- Ancho total base: 350.80 mm (≈ 35.08 cm)
- Altura total: 350.80 mm (≈ 35.08 cm)
- Diámetro de perforaciones: Ø50 mm
- Área útil neta del módulo NET: ≈ 320 cm²

Estas dimensiones permitieron desarrollar un sistema compacto manteniendo integración entre cultivo, energía y electrónica.

El sistema fue evaluado durante un ciclo piloto de 30 días posteriores al ingreso de plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) con una altura inicial aproximada de 6cm a 8cm al microinvernadero, utilizando un módulo NFT de seis plantas.

Coeficiente de variación: 3.6 %

Comparación con sistema manual (6 plantas):

Incremento de rendimiento: +16.7 %

Reducción de variabilidad: 52 %

Los valores del sistema manual corresponden a un cultivo previo de la misma variedad de lechuga, realizado por el equipo investigador de forma manual dentro del mismo invernadero utilizado para el ciclo experimental automatizado, garantizando así condiciones ambientales de infraestructura equivalentes entre ambos casos. Dado que este cultivo de referencia no se realizó de manera estrictamente simultánea al ciclo automatizado, no se descarta cierta variación puntual asociada a la época del año en que se llevó a cabo cada cultivo. Aun así, al compartir el mismo entorno físico, el mismo tipo de semilla y el mismo equipo investigador, esta referencia constituye una base y directamente comparable para estimar la diferencia observada del sistema automatizado frente al manejo manual tradicional.

Finalmente, los resultados muestran mayor uniformidad y estabilidad del crecimiento bajo control automatizado.

4. Eficiencia energética

El sistema operó mediante una configuración autónoma compuesta por: Panel solar de 100 W y una batería de 75 Ah. Los resultados fueron:

Generación promedio diaria: 0.48 kWh

Autonomía nocturna: 16 horas

Autonomía total respecto a red eléctrica: 100 %

Comparado con sistema conectado a red:

Reducción de consumo eléctrico externo: -100 %

El sistema operó completamente off-grid durante el ciclo experimental. La generación energética promedio diaria medida fue de 0.48 kWh. Considerando la potencia nominal del panel fotovoltaico de 100 W, este valor equivale aproximadamente a 4.8 horas diarias de generación a potencia nominal bajo las condiciones observadas durante el periodo experimental.

5. Eficiencia Hídrica

Durante el ciclo experimental de 30 días, el consumo hídrico se estimó mediante el volumen acumulado de reposición.

Para el sistema NFT: 15L/ciclo y en un sistema de riego manual: 54L/ciclo. La recirculación permitió disminuir significativamente el uso del recurso hídrico.

De igual manera que en la comparación de producción, el valor de referencia del sistema de riego manual (54L/ciclo) proviene del mismo cultivo previo realizado dentro del mismo invernadero, por lo que constituye una base comparable y consistente con las condiciones ambientales del ciclo automatizado.

6. Desempeño del Modelo Random Forest

El modelo Random Forest fue entrenado utilizando variables ambientales y fisicoquímicas registradas por el sistema, incluyendo temperatura, humedad relativa, pH y conductividad eléctrica (CE), con el objetivo de apoyar la clasificación del estado operativo del microinvernadero mediante el Indicador Inteligente de Salud del Microinvernadero (IISM).

Los resultados (ver tabla 1), muestran que el modelo alcanzó un Accuracy de 91.2%, con una Precisión de 0.9047, un Recall de 0.8996 y un F1-score de 0.9018. Estos resultados evidencian un desempeño consistente del clasificador para identificar el estado operativo del microinvernadero.

De manera complementaria, durante la operación del sistema inteligente se observó una reducción del 45 % en las fluctuaciones de pH y del 34 % en la desviación de la conductividad eléctrica respecto de la referencia manual. Dado que en esta etapa piloto el sistema no incorporó dosificación automática de correctores de pH o nutrientes, el monitoreo continuo y las alertas generadas facilitaron la identificación temprana de desviaciones y apoyaron las intervenciones correctivas realizadas por el operador. Asimismo, la necesidad de intervención manual se redujo aproximadamente en 55 %, ver Tabla 1.

7. Estimación del costo de implementación y modularidad del sistema

Se realizó una estimación económica considerando la infraestructura, sensado, energía y automatización, ver Tabla 2. Desde la perspectiva económica, el prototipo presentó un costo estimado de implementación de USD 372, del cual el 37.9 % correspondió al subsistema energético, el 19.1 % al sistema hidropónico y de actuación, el 15.6 % al procesamiento y

control, el 13.4 % al sensado y el 14.0 % a la estructura e integración.

Tabla 1: Desempeño del modelo Random Forest para el monitoreo de microinvernadero

Métrica	Resultado
Accuracy	91.2 %
Precision	0.90
Recall	0.90
F1-score	0.92
Reducción de fluctuación de pH	45%
Reducción de desviación de CE	34%
Reducción de intervención manual	55%

Tabla 2 Recursos utilizados

Componente	Especificación utilizada	Cantidad	Costo unitario
Unidad de procesamiento	Raspberry Pi 4 (2 GB RAM)	1	40
Tarjeta microSD	32 GB Clase 10	1	6
Sensor ambiental	DHT22 / AM2302	1	5
Sensor temperatura agua	DS18B20 IP68	1	5
Sensor pH	Sonda pH 4502C	1	18
Sensor conductividad	EC analógico	1	22
Relé SSR	4 canales	1	12
Bomba agua NFT	12 V - 10 W	1	15
Ventilador	12 V	1	8
Lámpara LED crecimiento	espectro completo 20 W	1	18
Panel solar	Monocristalino 100 W	1	55
Controlador carga	PWM 10 A	1	15
Batería	LiFePO ₄ 12 V - 20 Ah	1	65
Convertidor DC-DC	12 V → 5 V	1	6
Sistema NFT	canales + conexiones	1	30
Estructura	acrílico + impresión 3D	1	40
Cableado y conectores	varios	1	12
TOTAL			372

Aunque la inversión inicial supera sistemas manuales convencionales, el diseño modular permite implementación progresiva y adaptación según disponibilidad económica.

Desde la perspectiva de comunidades vulnerables, el sistema constituye una alternativa orientada a:

- ahorro hídrico
- autonomía energética
- reducción de intervención técnica
- producción doméstica sostenible

Para facilitar la adopción en comunidades vulnerables, el diseño permite estrategias progresivas de implementación:

- Nivel básico (USD 90–130): Sistema NFT + reservorio + bomba de recirculación, estructura y operación manual.
- Nivel intermedio (USD 220–260): Incorporación al nivel anterior, sensores y automatización básica.
- Nivel completo (USD 372): Incorporación sistema fotovoltaico autónomo, almacenamiento energético, Iot, Random Forest e IISM.

Bajo este enfoque escalable, el sistema no busca competir con cultivos comerciales de gran escala, sino ofrecer una infraestructura doméstica resiliente orientada a seguridad alimentaria, autonomía energética y reducción del consumo de recursos, favoreciendo su replicabilidad en contextos urbanos y comunidades con limitaciones económicas.

V. Conclusión

El presente estudio permitió diseñar, implementar y realizar una validación preliminar de un sistema hidropónico compacto tipo NFT integrado con energía solar fotovoltaica, monitoreo IoT y control inteligente, orientado a entornos domésticos y comunidades vulnerables. La evaluación experimental se realizó durante 30 días posteriores al ingreso al microinvernadero de plántulas de lechuga con una altura inicial aproximada de 6cm a 8cm, permitiendo analizar el desempeño del sistema durante una etapa del crecimiento del cultivo.

Desde el punto de vista productivo, el sistema alcanzó una producción promedio de 280 ± 10 g por planta, obteniendo 1.68 kg por ciclo para seis plantas de lechuga, lo que representa un incremento del rendimiento de 16.7 % respecto a la referencia del cultivo manual utilizada (1.44 kg por ciclo). Adicionalmente, el coeficiente de variación del crecimiento se mantuvo en 3.8 %, acompañado de una reducción aproximada del 40 % en la variabilidad del cultivo, indicando mayor uniformidad y estabilidad del sistema bajo condiciones controladas.

En términos ambientales, el sistema NFT con recirculación permitió reducir el consumo hídrico de 54 L a 15 L por ciclo de cultivo, equivalente a una disminución del 72.2 % respecto al riego manual convencional. Asimismo, la integración fotovoltaica permitió operar bajo un esquema completamente autónomo (100 % off-grid), alcanzando una autonomía nocturna de 16 horas, una generación energética diaria de 0.48 kWh frente a un consumo promedio de 0.28 kWh, y una reducción estimada del 68 % de emisiones indirectas asociadas al uso de energía convencional.

Respecto al desempeño del sistema inteligente, el modelo implementado alcanzó un Accuracy 91.2%, Precisión 0.90. Recall 0.90, F1-score 0.92, permitiendo reducir las fluctuaciones de pH en 45 %, disminuir la desviación de conductividad eléctrica en 34 % y reducir la intervención manual requerida entre 50–60 %, favoreciendo una operación más estable y accesible para usuarios sin conocimientos técnicos especializados.

Desde la perspectiva económica, el prototipo presentó un costo estimado de implementación de USD 372. Del costo total, aproximadamente el 37.9 % correspondió al subsistema energético, el 19.1 % al sistema hidropónico y de actuación, el 15.6 % al procesamiento y control, el 13.4 % al sensado y el 14.0 % a la estructura e integración. Aunque la inversión inicial puede representar una limitación en determinados contextos, el diseño modular permite estrategias de implementación progresiva y escalable, facilitando su adaptación a distintos entornos domésticos y comunitarios según la disponibilidad de recursos y las necesidades de cada aplicación.

En conjunto, los resultados sugieren que la integración entre hidroponía NFT, automatización, inteligencia artificial y energía solar constituye una alternativa técnicamente viable para fortalecer la seguridad alimentaria urbana, incrementar la eficiencia en el uso de recursos y promover modelos domésticos de producción sostenible.

Si bien los resultados obtenidos muestran un desempeño favorable, estos corresponden a una evaluación preliminar desarrollada durante un único ciclo experimental de 30 días utilizando una sola especie vegetal.

En las líneas futuras de investigación se propone ampliar el periodo experimental, incorporar mayor volumen de datos para fortalecer el desempeño del modelo inteligente, evaluar diferentes especies vegetales y validar el sistema mediante estudios piloto en escenarios comunitarios reales.

VI. Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), mediante Resolución Rectoral N.º 005446-2025-R/UNMSM, en el marco del Concurso 2025 del Programa de Proyectos de Investigación para Grupos de Investigación (PCONFIGI), código de proyecto C25201251, titulado “Implementación de un invernadero hidropónico con inteligencia artificial y energía solar para la optimización de la producción de cultivos domésticos de forma sostenible”, 2025.

Referencia

- [1] CEPAL, *Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe* 2022. Santiago, Chile: Naciones Unidas, 2023. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/panorama-seguridad-alimentaria-nutricional-america-latina-caribe>
- [2] FAO, *Sistemas de tierras y aguas al límite: desafíos profundos para la productividad agrícola*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2021. <https://www.fao.org/3/CB7654ES>
- [3] Organización de los Estados Americanos (OEA), “Capítulo 9: Agricultura. Limitaciones para el desarrollo agrícola en la selva central,” en *Bienes y servicios naturales*. Washington, D.C., EE. UU.: Departamento de Desarrollo Sostenible, 2021. <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea27s/ch12.htm>
- [4] Universidad Nacional Agraria, *Cultivos en callejones (Alley Cropping) en suelos de alta fragilidad: una alternativa para la agricultura sostenible*. Managua, Nicaragua, 2020. <https://repository.agrosavia.co/items/dfcfaf4c-39f6-401e-bd30-92ecfb481606>
- [5] M. A. Taboada et al., *Adaptación al cambio climático en sistemas agropecuarios de América Latina*. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Argentina, 2020. <https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar>
- [6] E. Johansson, R. Martin and K. Mapunda, “Climate vulnerability of agroecological and conventional smallholders in Mvomero District, Tanzania: Using mixed-methods to uncover local experiences and motivations of farming for the future,” *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 8, Art. no. 1423861, 2024. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1423861>
- [7] N. E. Fonseca Carreño and J. A. Fonseca Carreño, “Socioecological resilience in agricultural agro-ecosystems in Sumapaz Cundinamarca,” *Ciencia en Desarrollo*, vol. 15, no. 1, pp. 1–12, 2024. <https://doi.org/10.19053/01217488.v15.n1.2024.16652>
- [8] G. Rajaseger et al., “Hydroponics: Current trends in sustainable crop production,” *Bioinformation*, vol. 19, no. 9, pp. 925–938, 2023. <https://doi.org/10.6026/97320630019925>
- [9] Y. S. Goh, Y. C. Hum, Y. L. Lee, K. W. Lai, W. S. Yap and Y. K. Tee, “A meta-analysis: Food production and vegetable crop yields of hydroponics,” *Scientia Horticulturae*, vol. 321, Art. no. 112339, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112339>
- [10] K. Chao, “Family farming in climate change: Strategies for resilient and sustainable food systems,” *Heliyon*, vol. 10, no. 7, Art. no. E28599, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28599>

- [11] S. Karimzadeh, Z. Li and M. S. Ahamed, "Machine learning-based fault detection and diagnosis of electrical conductivity and pH sensors in hydroponic systems," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 237, Art. no. 110544, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110544>
- [12] M. A. Yenikaya, O. Oktaysoy and G. Kerse, "Technological transformation and sustainable agriculture: Automation supported home-type hydroponic production system application," *Black Sea Journal of Agriculture*, vol. 8, no. 4, pp. 533–547, 2025. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1656377>
- [13] M. E. Puelles Bulnes, "Prototipo de un invernadero automatizado hidropónico NFT con dos microclimas para el hogar basado en Internet de las Cosas," *Rev. Investig. Sist. Inform.*, vol. 16, no. 1, 2023. <https://doi.org/10.15381/risi.v16i1.25581>
- [14] M. E. Puelles Bulnes *et al.*, "Automated hydroponic greenhouse customized for family nutrition using plants varieties," in *22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0*, San José, Costa Rica, Jul. 17–19, 2024, Art. no. 2005. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.2005>
- [15] M. E. Puelles Bulnes, J. L. Inche Mitma, V. A. Atoche Espinoza, A. L. Atoche Puelles, M. Á. Gonzáles Lévano, Y. L. Cristobal Espinoza and Y. A. Atoche Puelles, "Smart Urban Farming with Sustainable Mini-Garden as a Technological Solution to Food Insecurity," *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, vol. 1, no. 12, 2025. <https://laccei.org/LACCEI2025-Mexico/meta/FP2454.html>
- [16] V. Gupta, R. Singh, D. Mishra, P. Sexena and N. Kapoor, "Smart agriculture: Leveraging IoT and machine learning for sustainable farming," *International Journal of Research Review in Applied Science, Humanities and Technology*, vol. 7, 2025. <https://doi.org/10.71143/R5SBB313>
- [17] K. N. Siddiquee *et al.*, "Development of algorithms for an IoT-based smart agriculture monitoring system," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, Art. no. 7372053, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7372053>
- [18] L. R. Reddy, V. Maheshwari, R. S. Kumar and Y. R. Reddy, "IoT based smart agriculture system with solar panel," in *Proceedings of the 7th International Conference on Inventive Material Science Applications (ICIMA)*, Namakkal, India, 2025, pp. 939–944. <https://doi.org/10.1109/ICIMA64861.2025.11073882>
- [19] V. D. Ávila Akerberg, "Traditional and modern agricultural practices in a periurban community close to Mexico City," in *Sustainable Agricultural Production Systems: Traditional and Modern Perspectives*. Palm Bay, FL, USA: Apple Academic Press / CRC Press, 2024. https://web.siiia.unam.mx/siiia-publico/v/include/modulo_productos/libros.php?id=655145
- [20] Y. Akkem, S. K. Biswas and A. Varanasi, "Smart farming using artificial intelligence: A review," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 120, Art. no. 105899, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105899>
- [21] O. Ogbolumani and B. Mabaso, "An IoT-based hydroponic monitoring and control system for sustainable food production," *Journal of Digital Food, Energy and Water Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 106–140, 2023. https://doi.org/10.36615/digital_food_energy_water_systems.v4i2.2873
- [22] K. Kumari, A. M. Nafchi, S. Mirzaee and A. Abdalla, "AI-driven future farming: Achieving climate-smart and sustainable agriculture," *Agriengineering*, vol. 7, no. 3, pp. 1–30, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030089>
- [23] H. Shahab, M. Iqbal, A. Sohaib, F. U. Khan and M. Waqas, "IoT-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 220, Art. no. 108851, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108851>
- [24] M. G. Osman and G. Lazaroiu, "Harnessing solar energy for sustainable development in rural communities," *Agriculture*, vol. 15, no. 19, pp. 1–32, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriculture15192021>
- [25] A. A. Alnasser *et al.*, "Renewable resilience in conflict: Lessons learned from Syria's solar-powered electric health vehicles," *Frontiers in Public Health*, vol. 13, pp. 1–11, 2025. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1560063>
- [26] A. Pena *et al.*, "A solar photovoltaic system applied to açai production and the development of riverside communities in the Amazon," *Sustainability*, vol. 17, no. 6, pp. 1–21, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17062447>
- [27] A. Z. Abdullah, N. Azizan and Z. Bohari, "Implementation of solar street lighting for empowering rural communities," in *BIO Web of Conferences*, vol. 137, 2024. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413703001>
- [28] M. T. Linaza *et al.*, "Data-driven artificial intelligence applications for sustainable precision agriculture," *Agronomy*, vol. 11, no. 6, Art. no. 1227, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061227>