

Implementación de un Sistema de Control de Temperatura y humedad en un Invernadero Ejidal con Iot

Implementation of a Temperature and Humidity Control System in a Common Greenhouse Using IoT

Padilla-Macías, E.¹, Ortiz-Aguilar, L.^{1*}  Funes-Tapia, J.¹  Xoca-Orozco, L.¹ 
(*ldm_oa@hotmail.com)

Recibido: 12-06-2025 Aceptado: 23-09-2025

RESUMEN

Este artículo describe la implementación de un sistema de bajo costo para el monitoreo de temperatura y humedad en invernaderos ejidales, utilizando tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). El desarrollo se orienta a atender la necesidad de productores en Guanajuato, México, que enfrentan limitaciones para acceder a sistemas comerciales de automatización debido a su alto costo. La solución propuesta integra sensores DHT11 para temperatura y humedad ambiental, un sensor NPK para humedad del suelo, un microcontrolador ESP32 y la plataforma ThingSpeak para la gestión y visualización de datos en la nube. La arquitectura del sistema se organizó en cuatro capas: infraestructura física, comunicación mediante WiFi, almacenamiento en la nube y acceso remoto para el usuario. Durante las pruebas preliminares, realizadas en un invernadero

ejidal, se registraron temperaturas entre 29,4 °C y 42,5 °C y humedad relativa entre 24 % y 39 %, además de valores diferenciales de humedad del suelo entre distintos puntos del túnel. Se diseñó también una carcasa protectora para mejorar la durabilidad de los componentes electrónicos bajo condiciones ambientales adversas. Los resultados muestran que, aunque existen limitaciones en la precisión y resistencia de los sensores de bajo costo, el sistema permite generar información útil y en tiempo real para la gestión del invernadero. Esto contribuye a la toma de decisiones en el riego y la ventilación y sienta bases para mejorar la planificación de la producción, la trazabilidad y la integración con la cadena de suministro agrícola.

Palabras clave: Invernadero ejidal, Control de tem-

¹Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón



peratura y humedad, Internet de las cosas (IoT), Sensores ambientales, Agricultura inteligente, Automatización agrícola, Tecnologías de bajo costo, Optimización agrícola.

ABSTRACT

This article presents the implementation of a low-cost IoT-based system for monitoring temperature and humidity in communal greenhouses in Guanajuato, Mexico. The solution integrates DHT11 sensors for ambient temperature and humidity, an NPK sensor for soil moisture, an ESP32 microcontroller, and the ThingSpeak platform for cloud data management and visualization. The architecture was structured in four layers: physical infrastructure, WiFi communication, cloud storage, and remote user access. Preliminary tests recorded temperature values between 29,4 °C y 42,5 °C and relative humidity between 24 % and 39 %, while soil moisture measurements revealed spatial variability within the greenhouse. A protective casing was also de-

signed to increase the durability of electronic components under adverse environmental conditions. Although the accuracy and robustness of low-cost sensors impose certain limitations, the system provides real-time data that supports decisions on irrigation and ventilation. These results highlight its potential to enhance production planning, facilitate traceability, and facilitate integration into the agricultural supply chain.

Keywords: Communal greenhouse, Temperature and humidity control, Internet of Things (IoT), Environmental sensors, Smart agriculture, Agricultural automation, Low-cost technologies, Agricultural optimization.

INTRODUCCIÓN

Los invernaderos son importantes en el sector agrícola; en Guanajuato es uno de los estados de los cuales forma parte con producciones de frutas y verduras en la entidad. Un invernadero es vital para el cuidado de los cultivos del cual se necesitan diversos requerimientos para su uso, como lo es el presupuesto de instalación, el tipo de estructura que se desea utilizar y el control de las plagas que debe realizarse con regularidad [1].

En consecuencia, se puede tener una baja producción y eficiencia, que a su vez produce un bajo índice de producción, puede dar un impacto negativo significativo al sector agrícola [2].

En el estado de Guanajuato existen diferentes invernaderos ejidales que cuentan con la problemática de no llevar histórico de datos de sus cosechas, medición de variables de temperatura, etc. Lo anterior se debe a que los sistemas sofisticados de automatización son muy caros y difíciles de comprar para los dueños de los invernaderos. Por ello, a lo anterior se diseñó un sistema de bajo costo que sea aplicable y replicable para instalar en invernaderos. Dicho sistema comenzó con el diseño en un software especializado de la estructura interna del lugar, donde se detalló posteriormente una red de sensores de humedad

y temperatura, de además comparar tecnologías de bajo costo que sean eficientes y duraderas ante las condiciones ambientales que puede presentar un invernadero, para que de este modo pueda arrojar datos de almacenados en la nube y que sean accedidos por el dueño y técnicos.

Este artículo consta de cinco secciones posteriores, la primera es el estado del arte en cuanto a trabajos relacionados a invernaderos inteligentes. La sección dos es el marco teórico del trabajo. La sección tres es donde se detalla la metodología y finalmente en la sección de resultados las conclusiones y el trabajo futuro.

ESTADO DEL ARTE

En el trabajo realizado por [10], se propuso un modelo de integración de tecnologías IoT e inteligencia artificial (IA) para convertir invernaderos automatizados en entornos inteligentes. Los autores desarrollaron una plataforma hardware-software basada en dispositivos embebidos y algoritmos de predicción (como Random Forest), implementados en Python, para optimizar el control climático, riego y ventilación en un invernadero experimental de la Universidad de Alicante. El diseño, estructurado en capas (sensores, control, comunicación y servicios en la nube), demostró su eficacia al predecir temperaturas internas con un error cuadrático medio (RMSE) aceptable, integrando subsistemas previamente independientes. Sin embargo, la escalabilidad del modelo en invernaderos más grandes o con cultivos diversos requiere validación adicional, así como la inclusión de algoritmos de IA más avanzados, como redes neuronales profundas, para mejorar la precisión en condiciones climáticas extremas.

En la investigación realizada por [11], se desarrolló un sistema IoT automatizado para invernaderos hidropónicos, diseñado para satisfacer las demandas de comunidades locales mediante el análisis predictivo del mercado y el control preciso de variables ambientales. Los autores implementaron una red de sensores inalámbricos basada en ZigBee para monitorear factores críticos como temperatura, humedad, CO_2 , pH y oxígeno disuelto, integrando actuadores como bombas de agua, generadores de CO_2 y luces LED. Los datos se procesaron en la nube mediante algoritmos de aprendizaje automático (redes neuronales artificiales y LSTM) para predecir rendimientos agrícolas y optimizar condiciones de cultivo. A diferencia de sistemas tradicionales, este modelo combina automatización con recomendaciones de mercado en tiempo real, logrando un enfoque integral desde la producción hasta la comercialización. Sin embargo, la dependencia de conectividad 2.5G o 3G para la transmisión de datos podría limitar su escalabilidad en zonas rurales con infraestructura deficiente.

En el trabajo realizado por [12], se implementó un sistema de riego automatizado para invernaderos utilizando Controladores Lógicos Programables (PLC), combinando temporizadores basados en reloj y sensores de humedad del suelo. Los autores diseñaron un prototipo en miniatura con dos macetas: una regada únicamente por temporización (07:00 AM diariamente) y otra con riego adicional activado por un sensor capacitivo de humedad conectado a Arduino, que enviaba señales al PLC. El sistema demostró

ser eficiente, mostrando una diferencia de 450 ml en el consumo de agua después de 10 días, evidenciando el funcionamiento del riego complementario basado en sensores. Sin embargo, el estudio identificó limitaciones en la monitorización en tiempo real del estado del suelo, ya que la única retroalimentación era indirecta (variación en el volumen de agua). La investigación destaca la viabilidad del PLC para automatizar tareas repetitivas en invernaderos, aunque su escalabilidad a sistemas más complejos requiere validación adicional.

MARCO TEÓRICO

El diseño de un sistema de monitoreo ambiental en invernaderos requiere una base conceptual que vincule la infraestructura agrícola con las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). A continuación, se presentan los elementos teóricos que sustentan este trabajo, organizados en torno a la función de los invernaderos, los sensores utilizados y el módulo de procesamiento y comunicación.

INVERNADERO

Un invernadero puede definirse como una estructura diseñada para modificar y controlar las condiciones ambientales que rodean un cultivo, con el fin de optimizar su crecimiento y desarrollo. De acuerdo con [3], estas construcciones pueden estar constituidas por marcos metálicos o plásticos, cubiertos por materiales translúcidos que permiten el paso de radiación solar suficiente para la fotosíntesis. Además, como menciona [4], los invernaderos no solo protegen a los cultivos de factores externos como plagas o condiciones climáticas adversas, sino que también pueden incluir sistemas de captación de agua de lluvia y de ventilación controlada.

Según Moreno Vega [5], el diseño y construcción de un invernadero condiciona en gran medida su eficiencia. Existen diversas tipologías que varían en función del material y la geometría de la cubierta:

- **Estructura metálica:** Generalmente de acero galvanizado, permite mayor durabilidad y es la más común en invernaderos de mediana y gran escala.
- **Estructura de cerámica u hormigón:** Menos comunes, usadas en regiones específicas, como en Italia, por su capacidad de almacenamiento térmico.
- **Estructura de madera:** Tradicional en invernaderos artesanales, contruidos con maderas locales como eucalipto o pino.
- **Estructura mixta:** Combinan materiales (acero-madera o acero-hormigón) para equilibrar costos y resistencia estructural, frecuentes en modelos multitúnel.

En este proyecto, el sistema IoT se implementó en un invernadero ejidal con estructura metálica, lo cual facilitó la instalación de sensores y dispositivos, así como el tendido de cableado eléctrico y de comunicación.



Figura 1: *Ejemplo de invernadero.*

SENSORES PARA MONITOREO AMBIENTAL

El núcleo de un sistema IoT agrícola es la red de sensores, encargada de capturar en tiempo real variables críticas del microclima y del suelo. En este trabajo se emplearon dispositivos de bajo costo, seleccionados por su disponibilidad en el mercado y su aplicabilidad en contextos de recursos limitados.

SENSOR DHT11

El sensor DHT11 mide simultáneamente temperatura y humedad relativa del aire. Su rango de operación es de 0°C a 50°C y 20% a 90% de humedad, con un margen de error aproximado de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y $\pm 5\%$, respectivamente. Aunque su precisión es moderada, resulta adecuado para aplicaciones de monitoreo continuo en invernaderos, donde el objetivo principal es identificar tendencias y fluctuaciones más que realizar mediciones de laboratorio [6]. En este proyecto, el DHT11 fue la base para generar series de tiempo de las variables ambientales.

SENSOR LC-1329

El LC-1329 es un dispositivo de referencia que mide temperatura y humedad ambiental mediante infrarrojos. Su uso en este trabajo se centró en validar las mediciones del DHT11, lo que permitió establecer márgenes de error y verificar la confiabilidad del sistema de bajo costo. Como indican [8], este tipo de sensores, aunque diseñados para aplicaciones residenciales, resultan útiles como patrones comparativos en entornos experimentales.

SENSOR DE HUMEDAD Y NUTRIENTES DEL SUELO (NPK)

El sensor NPK proporciona información simultánea sobre humedad y concentración relativa de tres nutrientes esenciales para las plantas: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Estos parámetros son críticos en la agricultura de precisión, dado que el nitrógeno es fundamental para el crecimiento foliar, el fósforo interviene en la transferencia de energía y la formación de semillas, y el potasio regula procesos fisiológicos como la turgencia celular [9]. En este proyecto, el sensor NPK permitió detectar diferencias de humedad entre zonas del invernadero, además de proveer datos complementarios para una futura inte-

gración con estrategias de fertilización de precisión. Es importante señalar que este dispositivo no aporta nutrientes al suelo, sino que mide indirectamente su disponibilidad en la matriz edáfica.

MÓDULO ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo que integra conectividad WiFi y Bluetooth, además de múltiples entradas y salidas digitales y analógicas. De acuerdo con [11], este chip se caracteriza por su bajo consumo energético y su versatilidad en proyectos IoT. En el sistema desarrollado, el ESP32 cumplió la función de concentrador de datos, recopilando información de los sensores y enviándola a la nube a través de la plataforma ThingSpeak. Su integración fue fundamental para asegurar el acceso remoto a los datos en tiempo real.

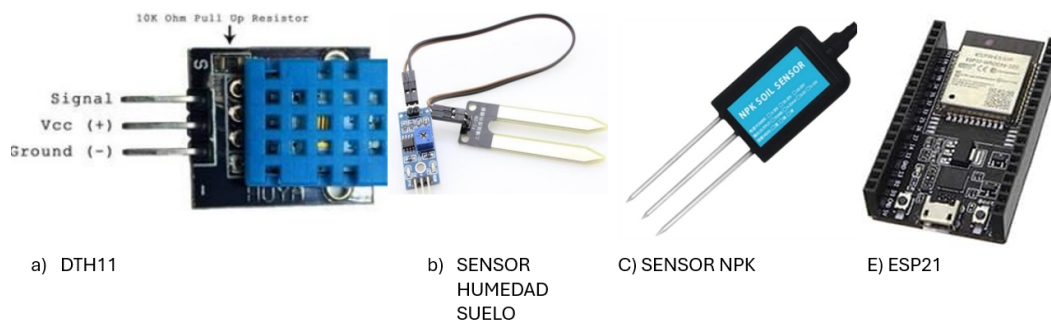


Figura 2: Sensores y dispositivos utilizados en el invernadero. Fuente: Elaboración propia.

METODOLOGÍA

La implementación del sistema de control ambiental con IoT se estructuró en fases secuenciales para asegurar su reproducibilidad en otros invernaderos y su integración con la cadena de suministro agrícola (trazabilidad, planeación de cosecha y logística).

FASE 1. REQUERIMIENTOS Y ALCANCE

Esta fase tiene como objetivo alinear necesidades del productor con variables a monitorear y restricciones operativas. Entradas: Reunión con propietario; dimensiones del invernadero; cultivos; disponibilidad de energía y red; presupuesto. Los pasos a seguir son :

1. Levantar ficha técnica del invernadero (área, número de túneles, materiales, ventilación, orientación).
2. Definir variables críticas: temperatura interna (°C), humedad relativa del aire (%), humedad del suelo (%) y (opcional) N-P-K.

3. Establecer requisitos de conectividad (WiFi disponible, calidad de señal, cobertura dentro del túnel).
4. Definir restricciones: presupuesto, reposición de sensores, mantenimiento y personal responsable.
5. Parámetros sugeridos: Cobertura WiFi mínima: > -65 dBm en puntos de medición. Intervalo de muestreo: 60300 s (adecuado a límite de ThingSpeak).

FASE 2. DISEÑO DE ARQUITECTURA (CUATRO CAPAS)

El objetivo de esta fase es definir la arquitectura modular en cuatro capas (Fig. 3) para garantizar escalabilidad.

Procedimiento:

1. **Capa física (invernadero):** ubicar puntos de medición considerando microclimas (entrada, centro, fondo, altura de dosel).
2. **Capa de comunicación:** ESP32 con WiFi; topología estrella (nodos-sensor, nodo concentrador ESP32).
3. **Capa de datos en nube:** ThingSpeak para almacenamiento y visualización.
4. **Capa de acceso/usuario:** paneles Web/móvil para consultas y alertas.
5. Parámetros sugeridos: Altura de sensores de aire: 1.21.5 m. Densidad mínima: 1 punto/100150 m^2 por túnel o > 4 puntos por túnel cuando existan gradientes térmicos marcados.

FASE 3. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES

En este paso se tiene que concretar materiales de bajo costo (Bill Of Materials BOM) y resistentes a condiciones del invernadero. Para lo anterior se hace:

1. **Seleccionar sensores:** DHT11 (T/HR ambiental) y sonda de humedad/NPK del suelo (LP68 NPK o equivalente).
2. **Seleccionar microcontrolador:** ESP32 con WiFi integrado.
3. Diseñar/seleccionar carcasa IP (ventilada) con disipación pasiva; prever malla anti-insectos y filtros antipolvo.
4. Incluir fuente de alimentación estabilizada y fusible; considerar banco de energía/UPS sencillo si hay cortes.

5. Parámetros sugeridos: Grado de protección carcasa $> IP54$. Cableado blindado para sondas de suelo > 1 m.

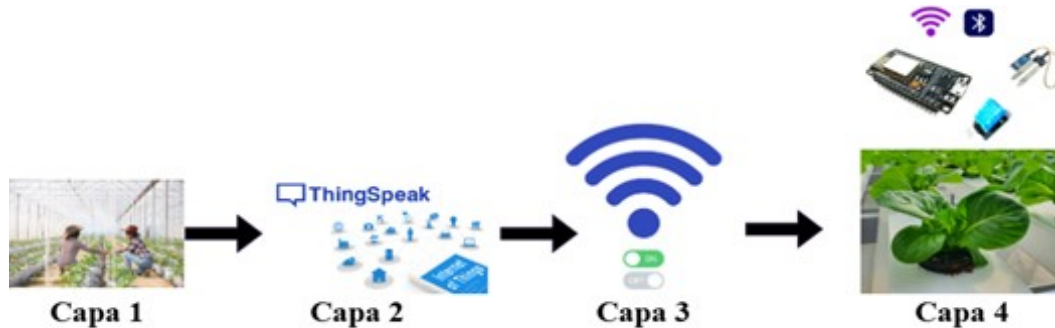


Figura 3: *Modelo de control Ambiental IoT. Fuente Elaboración propia.*

FASE 4. INSTALACIÓN FÍSICA Y MAPEO DE MICROCLIMAS

En esta fase se deben de instalar sensores en posiciones representativas y documentadas.

Procedimiento:

1. Marcar posiciones fijas (ej.: Entrada-izq., Centro-izq., Extremo-der., Fondo-der.) y alturas.
2. Separar sensores de fuentes de calor directas (paredes plásticas, motores, radiación directa).
3. Enterrar sonda de suelo a profundidad de raíz (1020 cm según cultivo); asegurar buen contacto suelo-sonda.
4. Etiquetar cada nodo con código único ($T_{nel_I}D$, Posición, Altura).
5. Parámetros: Distancia mínima a paredes laterales: mayor a 0.5 m. Tiempo de estabilización post-instalación: 1015 min antes de primera lectura.

FASE 5. FIRMWARE DEL ESP32 (ADQUISICIÓN Y ENVÍO)

En esta fase se programa la adquisición robusta y envío confiable a la nube.

Procedimiento:

1. Configurar librerías de sensores (DHT) y cliente HTTP.
2. Implementar rutina: lectura validación promedio móvil envío.
3. Manejar reintentos y cola local cuando no haya red (buffer circular en RAM/Flash).

4. Incluir marca de tiempo (RTC/NTP) y campos de identificación (Túnel, Punto, Cultivo).
5. Parámetros: Intervalo de muestreo: 60120 s (ThingSpeak acepta $> 15s$; 60s equilibra detalle/consumo). Promedio móvil: ventana 35 muestras para suavizar ruido.

FASE 6. CONFIGURACIÓN DE LA NUBE (THINGSPEAK)

En esta etapa se tiene que estandarizar el esquema de datos y paneles. Con los siguientes pasos:

- Crear Channel por invernadero (o por túnel si es grande).
- Mapear campos:
 - $field1 = Temp_C$, $field2 = HumRel_{pct}$, $field3 = HumSuelo_{pct}$, $field4 = N_{mgkg}$, $field5 = P_{mgkg}$, $field6 = K_{mgkg}$, $field7 = T_{nelID}$, $field8 = P_{untoID}$.
- Activar Public/Private View y gráficos (línea/último valor).
- Generar Write API Key (para el ESP32) y Read API Key (para terceros).
- Configurar alertas (React) por umbrales, p. ej.: si $Temp_C > 35^{\circ}C$ durante 10 min, se manda una alerta por correo/Telegram.
- Formato de actualización (HTTP GET).

FASE 7. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN

En esta fase se tiene que asegurar que las lecturas sean confiables. Los pasos a realizar son:

- Temperatura/Humedad (DHT11): verificación cruzada con termohigrómetro de referencia en 23 puntos/condiciones; ajustar sesgo si es necesario.
- Humedad del suelo: método gravimétrico simple en 3 muestras (peso húmedo/seco) para aproximar % humedad y comparar con sonda.
- NPK (si aplica): verificar con tiras reactivo/lab rápido en una muestra representativa.
- Parámetros:
 - Aceptar desviaciones: $Temp + - 1,0 - 1,5C$; $HR + -5 - 7\%$; Hum. suelo $+ - 5$ puntos.

FASE 8. PRUEBAS POR ETAPAS

Con las pruebas se valida la robustez antes de operación continua. El Procedimiento siguiendo tu historial de pruebas:

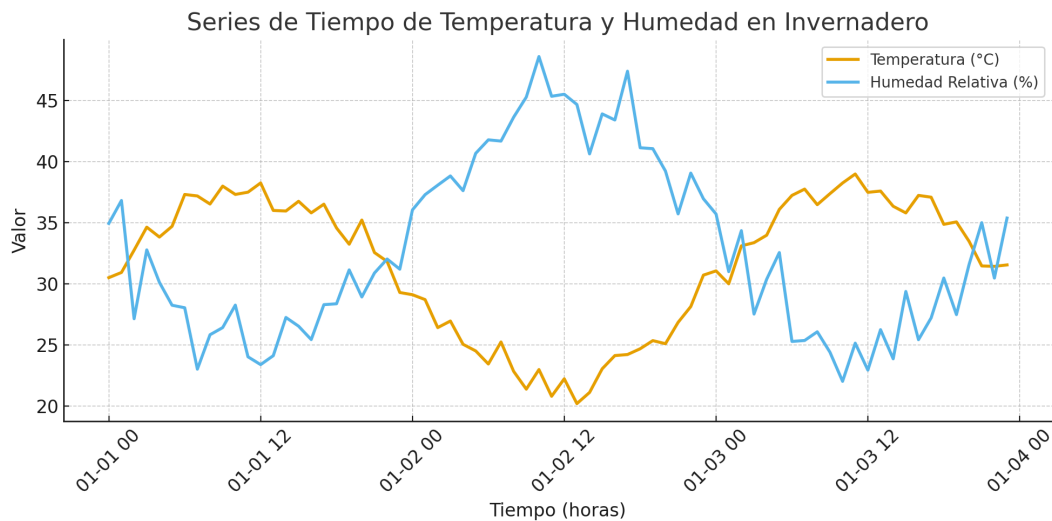


Figura 4: Series de tiempo de temperatura y humedad relativa en el invernadero durante tres días consecutivos.

- Pruebas preliminares: lecturas básicas de T/HR y suelo con DHT11 y sonda; verificar rangos esperados.
- Pruebas con LC-1329 (IR): comparar lecturas de T/HR en tiempo real contra DHT11; evaluar estabilidad térmica del encapsulado.
- Pruebas integrales: ESP32 + DHT11 + LP68 NPK enviando a ThingSpeak; revisar continuidad de datos 4872 h.

RESULTADOS

El sistema propuesto fue evaluado durante un periodo de 15 días en un invernadero ejidal ubicado en Guanajuato, México, con cultivos hortícolas de ciclo corto. Las mediciones se realizaron en intervalos de 60 segundos y se almacenaron en la plataforma ThingSpeak, permitiendo la generación de series de tiempo continuas para temperatura, humedad relativa del aire y humedad del suelo.

SERIES DE TIEMPO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

En la Figura 4 se muestran los registros de temperatura y humedad relativa captados por el sensor DHT11 durante 72 horas continuas de operación. Se observa que la temperatura varió entre 29,4 °C y 42,5 °C, mientras que la humedad relativa fluctuó entre 24 % y 39 %. Estas oscilaciones corresponden a los ciclos naturales de radiación solar y ventilación del invernadero, confirmando la capacidad del sistema para detectar microclimas internos.

Tabla 1: Mediciones de humedad del suelo en un túnel del invernadero.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Medición obtenida	211	184	176	131	173	165	129	105	138	116

Tabla 2: Costo de los BOM utilizados

Componente	Cantidad	Especificación	Costo unitario (MXN)	Proveedor
Sensor DHT11	2	Temp. y HR ambiental	50	Steren/Amazon
Sensor NPK	1	Nutrientes y humedad	500	AliExpress
ESP32	1	WiFi integrado, 30 pines	250	Steren/Mouser
Carcasa IP54	1	Plástico ABS, disipador	120	Mercado Libre
Fuente 5V 2A	1	Regulada	90	Electrónica local

MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO

La Tabla 1 resume los valores de humedad del suelo obtenidos en diez puntos de muestreo del primer túnel, mediante el sensor NPK. Los valores fluctuaron entre 105 y 211 unidades, evidenciando diferencias significativas entre zonas, lo que permite optimizar la aplicación de riego.

COMPARATIVA DE COSTOS

Las Tablas 3 y 2 presentan una comparación entre el prototipo desarrollado y sistemas comerciales de automatización agrícola. El costo total del sistema IoT propuesto fue de aproximadamente 1,200 MXN (65 USD), mientras que soluciones comerciales similares superan los 25,000 MXN (1,350 USD). Esto confirma que el desarrollo es significativamente más accesible para productores ejidales.

VALIDACIÓN CON INSTRUMENTO PATRÓN (LC-1329)

Se realizaron 30 mediciones comparativas entre los sensores DHT11 y el dispositivo LC-1329. La Figura 5 y la Figura 6 muestran las series de temperatura y humedad obtenidas en 24 horas. El DHT11 presentó un error promedio de ± 1.1 °C en temperatura y ± 3.1 % en humedad relativa respecto al LC-1329, dentro de los rangos aceptables para aplicaciones agrícolas.

Se llevaron a cabo tres ciclos de pruebas con los mismos dispositivos, en diferentes días y horarios. En cada ciclo, los resultados mostraron tendencias consistentes, confirmando la reproducibilidad del sistema. La estandarización del intervalo de muestreo (60 s) y el almacenamiento en la nube permiten

Tabla 3: Comparación de costos entre el sistema desarrollado y soluciones comerciales.

Sistema	Funcionalidad	Costo aproximado
Prototipo IoT (ESP32 + DHT11 + NPK + ThingSpeak)	Monitoreo T/HR y suelo, nube	\$1,200 MXN
Sistema comercial básico	Monitoreo T/HR	\$25,000 MXN
Sistema comercial avanzado	Monitoreo + control riego/ventilación	\$40,000 MXN

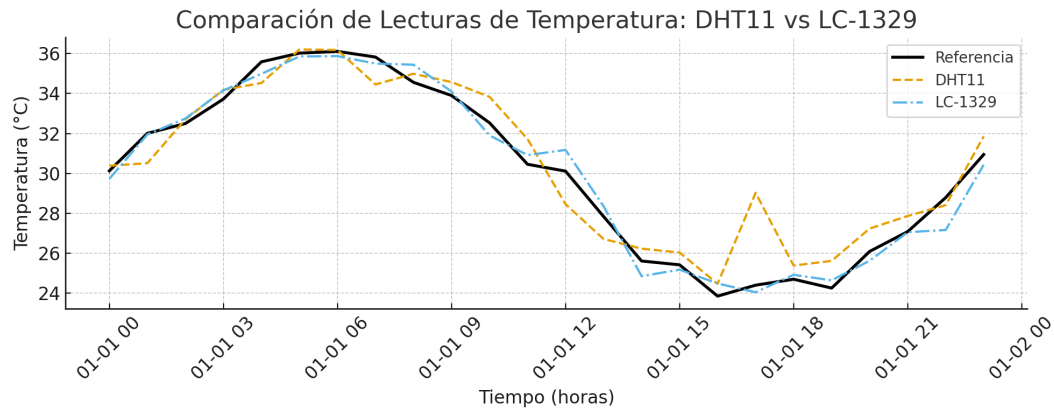


Figura 5: Comparación de lecturas de temperatura: DHT11 vs LC-1329.

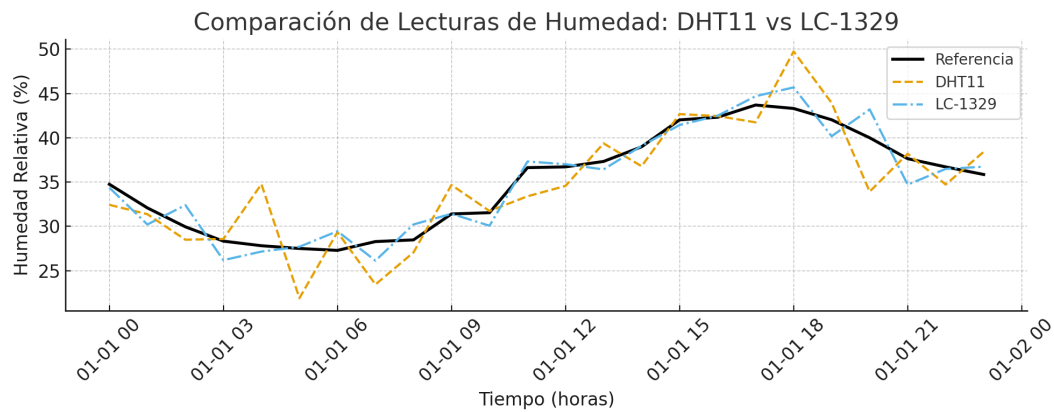


Figura 6: Comparación de lecturas de humedad relativa: DHT11 vs LC-1329.

Tabla 4: Validación del sensor DHT11 frente al dispositivo LC-1329.

Variable	Diferencia promedio (DHT11 vs LC-1329)	Rango aceptable en agricultura
Temperatura (°C)	± 1.1	± 2.0
Humedad relativa (%)	± 3.1	± 5.0

que la metodología pueda ser replicada en otros invernaderos con condiciones similares. El sistema fue probado únicamente en un invernadero debido a restricciones logísticas y de recursos. Sin embargo, el enfoque modular facilita su escalabilidad a múltiples invernaderos con configuraciones similares. En estudios futuros se contempla su validación en invernaderos de mayor superficie y con diferentes cultivos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el sistema IoT desarrollado es funcional para el monitoreo básico de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo en un invernadero ejidal. No obstante, es importante reconocer que el desempeño estuvo condicionado por las características de los sensores empleados y por las limitaciones propias del entorno experimental. En cuanto a la precisión, los sensores DHT11 presentaron desviaciones promedio de ± 1.1 °C y ± 3.1 % en comparación con el dispositivo LC-1329. Aunque estos valores se encuentran dentro de márgenes aceptables para agricultura, no alcanzan la exactitud requerida en aplicaciones de investigación avanzada. Además, la variabilidad de las lecturas bajo condiciones de alta radiación solar y cambios bruscos de humedad resalta la necesidad de considerar técnicas de calibración periódica y, en un futuro, sensores con mayor robustez.

Otro aspecto relevante fue la durabilidad de los componentes electrónicos. Durante las pruebas se detectó sensibilidad de los sensores a las altas temperaturas internas del invernadero, lo que sugiere la necesidad de mejorar el diseño de las carcasas protectoras y contemplar sistemas de ventilación pasiva. Estas limitaciones evidencian que, si bien los dispositivos de bajo costo son una alternativa viable para pequeños productores, requieren mantenimiento preventivo y reposición frecuente para asegurar continuidad de datos. En cuanto a la conectividad, el uso exclusivo de WiFi resultó adecuado para el entorno de prueba, pero puede limitar la escalabilidad en invernaderos rurales sin infraestructura de red estable. En este sentido, tecnologías de comunicación alternativas como LoRa, ZigBee o NB-IoT constituyen líneas de mejora identificadas directamente a partir de la experiencia experimental. Desde la perspectiva de la cadena de suministro agrícola, los datos obtenidos permitieron identificar microclimas y variaciones de humedad que influyen en la calidad del cultivo y, por ende, en la planeación de cosecha y logística. Sin embargo, para que esta información pueda integrarse de manera efectiva en decisiones de mercado, sería necesario incorporar más variables críticas como la concentración de CO₂, la radiación fotosintéticamente activa o indicadores de plagas. Esto permitiría que el sistema trascienda el monitoreo básico y se convierta en una herramienta de apoyo para la trazabilidad y certificación de calidad en la cadena de valor.

El trabajo futuro se orienta, por tanto, a superar las limitaciones encontradas durante las pruebas experimentales. Resulta fundamental explorar la integración de sensores más precisos y resistentes, así como el rediseño de carcasas que soporten mejor las condiciones ambientales del invernadero. Igualmente, es necesario evaluar tecnologías de comunicación que garanticen la transmisión continua de datos en entornos rurales y avanzar hacia pruebas comparativas en distintos tipos de invernaderos y cultivos para validar

la replicabilidad del sistema. Solo a partir de estos ajustes podrá considerarse una integración más amplia con plataformas de gestión agrícola y logística que fortalezcan la trazabilidad y la eficiencia de la cadena de suministro. En conclusión, este trabajo demuestra la factibilidad de utilizar dispositivos IoT de bajo costo en invernaderos ejidales, con el beneficio de acercar tecnologías digitales a pequeños productores. Sin embargo, el estudio también deja claro que la adopción de estas soluciones exige un reconocimiento de sus limitaciones y un plan de mejora continua que incremente su confiabilidad y escalabilidad. De esta manera, se podrán sentar bases más sólidas para su integración en la agricultura de precisión y en la gestión de cadenas de suministro agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y al Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNII) en conjunto con el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón División de ingeniería en Sistemas Automotrices por su tiempo y apoyo para el desarrollo de esta investigación.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Erick Padilla-Macías: Conceptualización, Metodología, Software y Hardware. **Lucero Ortiz-Aguilar:** Conceptualización, Redacción - Preparación del borrador original, Revisión y Edición. **Julio Funes-Tapia:** Investigación **Luis Xoca-Orozco:** Revisión y Edición.

REFERENCIAS

- [1] M. Gómez and A. D. V. Villicaña. El sector agropecuario en México ante el cambio climático. *Its'i Echeri Revista de Divulgación de Estudios Económico Agroalimentarios y del Desarrollo Rural*, 2(4):17–25, 2024.
- [2] J. A. R. Aguilar, Z. S. H. Veleros et al. Impacto Económico y Ambiental de las Energías Renovables y No Renovables en México. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 11(22):17–27, 2023.
- [3] N. Rivero Rodríguez. *Mantenimiento y manejo de invernaderos: UF0016*. IC Editorial, 2018. ISBN: 9788491982234. 207 pp. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/bibliotecpurisima/titulos/59192>.
- [4] M. Fuster Roig. *Producción de plantas y tepes en viveros*. Bubok Publishing S.L., 2018. ISBN: 9788468655826. 146 pp. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/bibliotecpurisima/titulos/51376>.
- [5] A. Moreno Vega. *Manejo y mantenimiento de invernaderos*. Ediciones Mundi-Prensa, 2017.

-
- [6] E. R. López Ordoñez. Diseño de un sistema de supervisión y control de parámetros de un invernadero automatizado. Tesis de doctorado, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2020.
 - [7] A. A. Guijarro-Rodríguez, L. J. C. Torres, D. K. Preciado-Maila, and B. N. Z. Manzur. Sistema de riego automatizado con Arduino. *Sistema*, 39(37):27, 2018.
 - [8] E. Tiscornia and A. De Felipe. Domótica: La vivienda inteligente. *Consultado el*, 15, 2015.
 - [9] R. Madhumathi, T. Arumuganathan, and R. Shruthi. Soil NPK and moisture analysis using wireless sensor networks. In *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
 - [10] F. J. Ferrández-Pastor, S. Alcañiz-Lucas, J. M. García-Chamizo, and M. Platero-Horcajadas. Smart environments design on industrial automated greenhouses. In *Proceedings*, 31(1):36. MDPI, 2019.
 - [11] N. Li, Y. Xiao, L. Shen, Z. Xu, B. Li, C. Yin et al. Smart agriculture with an automated IoT-based greenhouse system for local communities. *Advances in Internet of Things*, 9(02):15, 2019.
 - [12] T. B. Dwinugroho, Y. T. Hapsari et al. Greenhouse automation: Smart watering system for plants in greenhouse using programmable logic control (PLC). In *Journal of Physics: Conference Series*, 1823(1):012014. IOP Publishing, 2021.