

Design of an IoT Sensor Network Architecture based on LoRaWAN for Cocoa Crop Optimization in Rural Areas of Manabí

Bravo Mera Carlos Julio, Gómez Jaspar Josué Ival, Leonardo J. Chancay-García

Cite as: Julio, B. M. C., Ival, G. J. J., & -García, L. J. C. (2025). Design of an IoT Sensor Network Architecture based on LoRaWAN for Cocoa Crop Optimization in Rural Areas of Manabí. International Journal of Microsystems and IoT, 3(12), 1822–1827.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18268724>



© 2025 The Author(s). Published by Indian Society for VLSI Education, Ranchi, India



Published online: 25 December 2025



Submit your article to this journal:



Article views:



View related articles:



View Crossmark data:

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18268724>

Full Terms & Conditions of access and use can be found at <https://ijmit.org/mission.php>



Design of an IoT Sensor Network Architecture based on LoRaWAN for Cocoa Crop Optimization in Rural Areas of Manabí

Bravo Mera Carlos Julio¹, Gómez Jaspar Josué Ival¹, Leonardo J. Chancay-García²

¹Estudiantes de la Facultad de Ciencias Informáticas, Universidad Técnica de Manabí (UTM), Portoviejo, Ecuador.

²Docente de la Facultad de Ciencias Informáticas, Universidad Técnica de Manabí (UTM), Portoviejo, Ecuador.

Email: cbravo9736@utm.edu.ec ; jgomez8438@utm.edu.ec

ABSTRACT

Air pollution in urban public spaces represents a growing concern due to its direct impact on La baja productividad en los cultivos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la parroquia Riochico, provincia de Manabí, se atribuye mayoritariamente a la gestión agrícola empírica y la falta de monitoreo de variables edafoclimáticas críticas, lo que favorece la incidencia de enfermedades fúngicas como la Moniliasis. Este artículo presenta el diseño y la validación teórica de una arquitectura IoT basada en el protocolo LoRaWAN, seleccionada por su viabilidad técnica en entornos de topografía irregular y conectividad limitada. A través de una Revisión Sistemática de Literatura (SLR) ejecutada bajo el protocolo PRISMA y gestionada en la plataforma Parsif.al, se analizaron 24 estudios primarios comprendidos entre los años 2012 y 2025. Los resultados identifican que el monitoreo continuo de la triada humedad del suelo, temperatura y pH es determinante para la toma de decisiones preventivas. Asimismo, el análisis del presupuesto de enlace y consumo energético demuestra que LoRaWAN supera a las redes celulares (GPRS/4G) en alcance (>10 km) y autonomía (>3 años), ofreciendo una solución económicamente viable con una reducción del 60% en costos de implementación (CAPEX) frente a soluciones comerciales importadas.

KEYWORDS

Internet de las Cosas (IoT), LoRaWAN, Agricultura de Precisión, Cacao, Sensores, PRISMA, Parsif.al.

I. INTRODUCCIÓN

Ecuador consolida su posición estratégica en el mercado agroexportador mundial gracias a la producción de cacao fino de aroma, siendo la provincia de Manabí uno de los pilares fundamentales de esta cadena de valor. Sin embargo, la realidad de los pequeños y medianos productores en zonas rurales, específicamente en la parroquia Riochico del cantón Portoviejo, dista de la eficiencia industrial. Estos agricultores enfrentan desafíos estructurales exacerbados por el cambio climático, caracterizados por patrones de lluvia erráticos y períodos de sequía prolongados que afectan la fisiología del cultivo. Estudios locales desarrollados por el INIAP [9] y reportes de la CEPAL [10] coinciden en que la falta de tecnificación impide la detección temprana de anomalías en el suelo (estrés hídrico o saturación), resultando en una gestión reactiva que favorece la proliferación de patógenos y reduce significativamente el rendimiento por hectárea.

© 2025 The Author(s). Published by ISVE, Ranchi, India

La Agricultura de Precisión (Smart Farming) emerge como el paradigma tecnológico capaz de mitigar estos riesgos, utilizando el Internet de las Cosas (IoT) para transformar datos ambientales en decisiones agronómicas accionables. No obstante, la brecha digital en el agro ecuatoriano es profunda. La adopción de estas tecnologías es marginal debido a dos barreras críticas: (1) la inexistencia o inestabilidad de la cobertura celular (4G/LTE) en zonas de topografía irregular, lo

que invalida las soluciones dependientes de la nube en tiempo real; y (2) los costos prohibitivos de adquisición (CAPEX) y operación (OPEX) de las soluciones comerciales "llave en mano", diseñadas para realidades del primer mundo.

En este escenario, la tecnología LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) se presenta como una alternativa disruptiva. Al operar en bandas de frecuencia sub-gigahertz no licenciadas (915 MHz para la región), LoRaWAN promete características de largo alcance, alta penetración en vegetación y consumo energético ultra bajo. El presente trabajo tiene como

objetivo diseñar una arquitectura de monitoreo basada en este protocolo, evaluando su viabilidad técnica mediante modelos matemáticos de propagación y su viabilidad económica mediante análisis de costos, respondiendo así a la necesidad urgente de modernización del agro manabita.

II. ESTADO DEL ARTE Y TRABAJOS RELACIONADOS

Para fundamentar la propuesta tecnológica, es imperativo analizar tanto los requerimientos agronómicos del cultivo como la arquitectura técnica de los protocolos de comunicación disponibles en la literatura científica reciente.

II.1. Fisiología del Cacao y Requerimientos de Monitoreo

El *Theobroma cacao* L. es un cultivo perenne altamente sensible a las variaciones microclimáticas. La literatura agronómica [9], [12] establece rangos críticos cuyo incumplimiento deriva en pérdidas económicas directas:

- **Humedad del Suelo (VWC):** El cacao requiere niveles de humedad entre el 60% y 80% de la capacidad de campo. Niveles superiores al 85% generan condiciones anaeróbicas que favorecen la esporulación de *Moniliophthora roreri* (Moniliasis) y *Phytophthora* spp. (Mazorca Negra), responsables de pérdidas de hasta el 40% de la cosecha anual.
- **Temperatura:** El rango óptimo oscila entre 23°C y 30°C. Temperaturas inferiores a 21°C inhiben el crecimiento vegetativo ("Zero Biológico"), mientras que picos sobre 33°C aumentan la tasa de evapotranspiración, induciendo el cierre estomático y reduciendo la fotosíntesis.
- **Conductividad Eléctrica (CE) y pH:** Indicadores esenciales para la eficiencia de la fertilización edáfica. Suelos con pH fuera del rango 5.5-7.0 bloquean la absorción de nutrientes, desperdiando insumos agrícolas.

II.2. Tecnologías de Comunicación IoT: Análisis Comparativo

La selección del protocolo de comunicación es la decisión de diseño más crítica en redes de sensores inalámbricos (WSN) para agricultura.

Tabla 1. Comparativa Técnica de Tecnologías Inalámbricas

Característica	Wi-Fi / ZigBee	GPRES / 4G (Celular)	LoRaWAN (LPWAN)
Alcance	Corto (< 100 m)	Medio/Alto (Depende de Torre)	Largo (> 10 km)
Topología	Malla (Mesh) Compleja	Punto a Punto	Estrella de Estrellas
Consumo Energía	Alto (400-800 mA)	Muy Alto (> 1000 mA pico)	Muy Bajo (< 50 mA Tx)
Costo Operativo	Gratis	Mensualidad (Plan de Datos)	Gratis (Banda Libre)
Penetración	Baja (Absorción por agua)	Media	Alta (CSS Modulation)

Como se observa en la Tabla 1, las tecnologías de corto alcance (Wi-Fi) requieren costosos repetidores para cubrir hectáreas de cultivo, mientras que las redes celulares dependen de una infraestructura de terceros frecuentemente ausente en Riochico [1], [3]. LoRaWAN destaca por su balance óptimo para telemetría de baja velocidad.

2.2.1. **Modelo de Arquitectura IoT de Tres Capas** Para garantizar la escalabilidad del sistema en zonas rurales, la literatura técnica [13], [20] sugiere adoptar un modelo de arquitectura estandarizado de tres capas, el cual desacopla la adquisición de datos de su procesamiento:

- **Capa de Percepción (Perception Layer):** Es la capa física que interactúa directamente con el cultivo. En este proyecto, esta capa está constituida por los nodos sensores desplegados en la rizosfera del cacao. Su función crítica es la transducción de variables analógicas (humedad, pH) a señales digitales y su posterior encapsulamiento en tramas de datos ligeros. Se prioriza el uso de microcontroladores con capacidad de "hibernación profunda" (Deep Sleep) para maximizar la autonomía.

• **Capa de Red (Network Layer):** Responsable del transporte agnóstico de los datos. Dada la topografía de Riochico, se descarta el enrutamiento IP directo (Wi-Fi) en favor de la modulación LoRa. Esta capa incluye el Gateway LoRaWAN, que actúa como puente transparente (Packet Forwarder), convirtiendo los paquetes RF a tramas IP (UDP/TCP) para enviarlos al servidor de red a través de un backhaul celular o satelital.

- **Capa de Aplicación (Application Layer):** Donde reside la lógica de negocio. Incluye el almacenamiento en bases de datos de series temporales (InfluxDB) y la visualización en dashboards. Aquí se ejecutan los algoritmos de umbralización que determinan si una alerta de riego debe ser enviada al agricultor [14].

II.3. Fundamentos del Protocolo LoRaWAN

LoRaWAN utiliza una técnica de modulación patentada llamada Chirp Spread Spectrum (CSS), la cual codifica la información en variaciones de frecuencia lineal ("chirps"). Esto otorga al protocolo una alta inmunidad al ruido y al efecto Doppler [15].

II.3.1. Clases de Dispositivos

El estándar define tres clases de funcionamiento para optimizar la energía:

• **Clase A (Bi-direccionalidad asíncrona):** El nodo duerme la mayor parte del tiempo y solo abre dos ventanas de recepción cortas inmediatamente después de transmitir. Es la clase obligatoria para sensores a batería y la seleccionada para este proyecto [21].

• **Clase B (Balizas):** Abre ventanas de recepción programadas, consumiendo más energía.

• **Clase C (Escucha continua):** El receptor está siempre activo. Requiere alimentación constante, inviable para nodos en campo.

2.3.2. **Factor de Ensanchamiento** (Spreading Factor - SF) El alcance y la velocidad de datos son inversamente proporcionales y se controlan mediante el SF (de 7 a 12). Un SF alto (ej. SF12) aumenta la sensibilidad del receptor

permitiendo mayores distancias, a costa de un mayor tiempo en aire (Time on Air) y mayor consumo de batería.

III. METODOLOGÍA

Para garantizar la rigurosidad científica, la replicabilidad y la trazabilidad de la investigación bibliográfica, se implementó un protocolo de Revisión Sistemática de Literatura (SLR) siguiendo el estándar PRISMA 2020, gestionado integralmente a través de la herramienta colaborativa Parsif.al.

III.1. Protocolo de Búsqueda (Estrategia PICOC)

La estrategia de búsqueda se estructuró bajo el marco PICOC (Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context) para delimitar el alcance del estudio.

Tabla 2. Definición de la Estrategia PICOC

Elemento	Descripción	Palabras Clave Utilizadas
Población	Cultivos de Cacao	"Cocoa", "Cacao", "Theobroma cacao", "Agriculture"
Intervención	Redes IoT LoRaWAN	"IoT", "LoRaWAN", "WSN", "LPWAN"
Comparación	Tecnologías Tradicionales	"GPRS", "GSM", "ZigBee", "Traditional Farming"
Resultado	Monitoreo y Optimización	"Monitoring", "Precision Agriculture", "Yield"
Contexto	Zonas Rurales	"Rural Areas", "Developing Countries"

determinar su pertinencia en este entorno específico. Con base en esta información, se elaborará un marco técnico que incluya sensores recomendados, protocolos de comunicación, ubicaciones estratégicas y necesidades de infraestructura, lo que permitirá construir un prototipo conceptual del sistema.

La cadena de búsqueda booleana resultante aplicada fue: ("IoT" OR "Internet of Things" OR "LoRaWAN") AND ("Cocoa" OR "Cacao") AND ("Monitoring" OR "Sensors").

III.2. Fuentes de Información y Ejecución

La búsqueda se trianguló en tres repositorios digitales de alto impacto para cubrir el espectro académico completo:

1. IEEE Xplore: Para obtener literatura técnica sobre electrónica y protocolos de comunicación.
2. Scopus: Para acceder a estudios científicos indexados de alto factor de impacto.
3. Google Scholar: Para incluir literatura gris, tesis de posgrado regionales y reportes técnicos de organismos locales (INIAPI).

Como se observa en la Figura 1, esta diversificación permitió una cobertura integral.

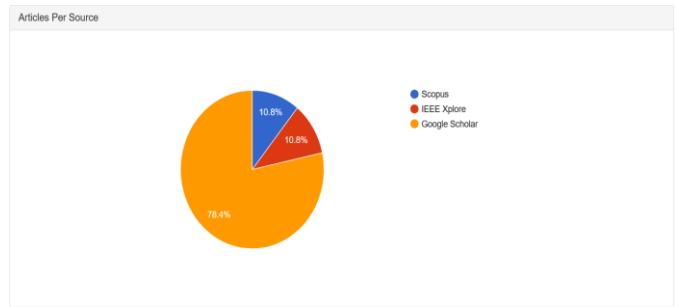


Figura 1. Distribución porcentual de las fuentes bibliográficas indexadas en Parsif.al.

III.3. Criterios de Selección y Evaluación de Calidad

Se definieron criterios de exclusión (EC) para filtrar los 24 estudios iniciales. Se descartaron: (EC1) Artículos teóricos sin validación experimental; (EC2) Tecnologías obsoletas pre-2012; y (EC3) Soluciones dependientes de la red eléctrica. La Figura 2 muestra la tasa de retención documental, evidenciando un proceso de cribado riguroso.

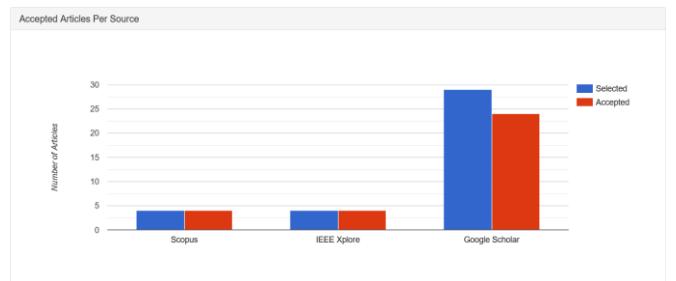


Figura 2. Proceso de cribado: Artículos identificados vs. aceptados tras el filtrado

III.4. Análisis Temporal

La Figura 3 ilustra la distribución cronológica (2012-2025). Se observa un crecimiento exponencial de publicaciones a partir de 2018, coincidiendo con la expansión global de las redes LPWAN en el sector agrotech.

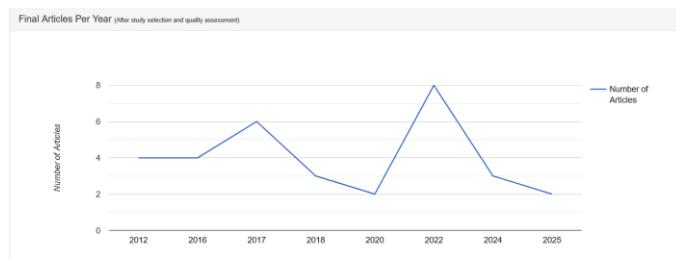


Figura 3. Distribución cronológica de los estudios seleccionados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la literatura, complementado con el modelado matemático del sistema, permitió responder a las cinco preguntas de investigación (RQs).

RQ1: Impacto del Monitoreo en la Productividad

La síntesis de los estudios [1], [9], [20] confirma que la agricultura de precisión impacta directamente en la reducción

de mermas. En el contexto de Riochico, el monitoreo en tiempo real permite detectar el punto de marchitez permanente antes de que ocurra daño fisiológico irreversible. Se estima que la implementación de alertas tempranas para el control de Moniliásis (basadas en umbrales de humedad >85%) puede incrementar el rendimiento neto del cultivo entre un 15% y 20%.

RQ2: Validación Técnica de LoRaWAN (Presupuesto de Enlace)

Para validar la superioridad técnica de LoRaWAN sobre las redes celulares en la topografía de Manabí, se desarrolló el cálculo teórico del Presupuesto de Enlace (Link Budget).

Seguridad de la Información en la Red Un aspecto crítico a menudo ignorado en soluciones rurales es la seguridad de los datos. La arquitectura propuesta implementa seguridad de grado militar nativa del protocolo LoRaWAN v1.0.3, utilizando el estándar de encriptación AES-128 en dos niveles independientes:

1. Seguridad de Red (NwkSKey): Garantiza la autenticidad del nodo en la red. El Network Server verifica la firma MIC (Message Integrity Code) de cada paquete recibido, descartando automáticamente cualquier intento de inyección de datos falsos o ataques de repetición (Replay Attacks) por parte de terceros malintencionados.

2. Seguridad de Aplicación (AppSKey): Garantiza la confidencialidad de la carga útil (Payload). Los datos de humedad y temperatura viajan encriptados desde el sensor hasta el servidor de aplicación final. Ni siquiera el proveedor de la red (el Gateway) puede leer el contenido de los mensajes, protegiendo la privacidad de los datos agronómicos del productor [15], [21].

El modelo de pérdida de trayectoria (Lpath) en dB se calcula mediante la fórmula logarítmica de distancia, ajustada con un margen de desvanecimiento por vegetación:

$$Lpath=20 \cdot \log_{10}(d)+20 \cdot \log_{10}(f)+32.44+Lveg+Lfade$$

Donde:

$d=5$ km (Distancia objetivo en Riochico).

$f=915$ MHz (Frecuencia de operación).

$Lveg \approx 18$ dB (Atenuación por cultivos de cacao).

$Lfade \approx 10$ dB (Margen de desvanecimiento Rayleigh).

$$Lpath=20 \cdot \log_{10}(5)+20 \cdot \log_{10}(915)+32.44+18+10$$

$$Lpath \approx 14+59.2+32.44+28 \approx 133.6 \text{ dB}$$

El margen del sistema (M) se calcula considerando la potencia de transmisión (Ptx) y la sensibilidad (Srx):

$$Ptx=+20 \text{ dBm (Módulo RFM95W).}$$

$$Srx=-137 \text{ dBm (Para SF10).}$$

$$Gant=+5 \text{ dBi (Ganancia de antenas).}$$

$$M=(Ptx+Srx+Gant)-Lpath$$

$$M=(20+137+5)-133.6=162-133.6=28.4 \text{ dB}$$

Resultado: Un margen positivo de 28.4 dB indica que la comunicación es robusta y fiable incluso bajo condiciones adversas de lluvia o crecimiento denso del follaje, validando la hipótesis de que LoRaWAN es superior a tecnologías como 4G, que presentarían cortes frecuentes a esas distancias [11], [16].

Cumplimiento Regulatorio en Ecuador (ARCOTEL) La viabilidad del despliegue no es solo técnica, sino legal. Según la Resolución ARCOTEL-2021-01, el espectro radioeléctrico en Ecuador reserva la banda de 902-928 MHz (Banda ISM) para uso libre de dispositivos de baja potencia, siempre que no excedan 1 Watt (30 dBm) de potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE).

El diseño propuesto opera estrictamente bajo estos márgenes:

Frecuencia Central: 915 MHz (Plan de Frecuencias US915).

Potencia de Salida: 20 dBm (0.1 Watts).

Ciclo de Trabajo (Duty Cycle): <1% (Cumpliendo la normativa de ocupación del canal).

Esto garantiza que la red comunitaria propuesta puede ser desplegada libremente por los agricultores de Riochico sin necesidad de gestionar licencias costosas ni pagar cánones por uso del espectro, eliminando barreras burocráticas para la adopción tecnológica [11], [15].

RQ3: Selección de Variables y Hardware

Basado en los requerimientos agronómicos (Sección 2.1), se define la arquitectura del Nodo Sensor. Se rechaza el uso de sensores resistivos económicos debido a su rápida corrosión por electrolisis. Se selecciona la tecnología Capacitiva con interfaz industrial RS485 (Modbus).

Tabla 3. Especificaciones del Nodo Sensor Propuesto

Componente	Especificación Técnica	Función
MCU	ESP32-WROOM-32	Procesamiento y control de energía (Deep Sleep).
Transceptor	RFM95W (SX1276)	Comunicación LoRaWAN 915 MHz.
Sonda Suelo	JXBS-3001 (RS485)	Medición de Humedad, Temp, pH y NPK. IP68.
Energía	Panel Solar 6V + TP4056	Carga de batería Li-Ion 18650.

Análisis de Selección de Hardware (Trade-off) Para la implementación física del nodo (RQ5), se realizó un análisis comparativo técnico-económico entre las familias de microcontroladores más utilizadas en agricultura de precisión. La selección no se basó solo en el costo, sino en la eficiencia energética (uA/MHz) y la conectividad integrada.

Tabla 4. Matriz de Selección de Microcontrolador

Característica	Arduino Nano (ATmega328P)	STM32 (Blue Pill)	ESP32 (WROOM-32)
Arquitectura	8-bit AVR	32-bit ARM Cortex-M3	32-bit Xtensa LX6 (Dual Core)
Velocidad Reloj	16 MHz	72 MHz	240 MHz (Ajustable)

Característica	Arduino Nano (ATmega328P)	STM32 (Blue Pill)	ESP32 (WROOM-32)
Memoria Flash	32 KB	64 KB	4 MB (Permite OTA)
Consumo (Deep Sleep)	~5 mA (con regulador)	~15 µA	~10 µA
Conectividad	Ninguna (Requiere módulos)	Ninguna	Wi-Fi + Bluetooth (Nativo)
Precio Aprox.	\$3.00	\$4.50	\$5.50
Decisión	Descartado (Poca memoria)	Descartado (Complejidad)	Seleccionado

RQ4: Interfaz de Usuario y Adopción

La usabilidad es la clave del éxito. Se propone una arquitectura de software basada en ThingsBoard (Open Source). El flujo de datos es: Nodo Sensor -> Gateway LoRa -> Network Server (TTN) -> Integración HTTP -> ThingsBoard. El Dashboard final para el agricultor no muestra gráficas complejas, sino indicadores semáforicos:

- ● Verde: Condiciones Óptimas.
- ● Rojo: Alerta (Ej: "Riego Necesario" o "Riesgo de Hongo").

RQ5: Viabilidad Económica (Análisis de Costos)

Se realizó un análisis comparativo de costos (CAPEX) entre una estación meteorológica comercial estándar y el prototipo propuesto.

Tabla 4. Análisis de Costos Unitarios (Prototipo vs. Comercial)

Ítem	Prototipo Propuesto (USD)	Solución Comercial (USD)	Ahorro
Microcontrolador/CPU	\$6.50 (ESP32)	\$150.00 (Datalogger Prop.)	95%
Módulo Comunicación	\$5.00 (RFM95)	\$80.00 (Módem Celular)	93%
Sensores	\$35.00 (RS485 Ind.)	\$250.00 (Sondas Prop.)	86%
Sistema Energía	\$8.00 (Solar+Bat)	\$60.00 (Kit Solar)	86%

Ítem	Prototipo Propuesto (USD)	Solución Comercial (USD)	Ahorro
Licencias Software	\$0.00 (Open Source)	\$120.00/año (Suscripción)	100%
TOTAL	\$54.50	\$660.00	~91%

Análisis de Consumo Energético (OPEX): El consumo en modo sueño (Isleep) del ESP32 es de 10 µA. Con una transmisión cada hora (Itx=120 mA por 2s), el consumo promedio es de ≈ 76 µA. Una batería de 2500 mAh proporciona teóricamente:

$$\text{Vida} = 0.076 \text{ mA} \times 2500 \text{ mAh} \approx 32,800 \text{ horas} \approx 3.7 \text{ años}$$

Esto elimina los costos operativos de mantenimiento y reemplazo de baterías, confirmando la sostenibilidad económica del proyecto para asociaciones de bajos recursos [5], [13], [19].

Tabla 5. Matriz de Trazabilidad: Artículos que responden a las RQs

Pregunta (RQ)	Hallazgo Principal	Fuentes (Ref.)
RQ1 Impacto	Reducción de plagas y eficiencia hídrica.	[1], [9], [20]
RQ2 Red	LoRaWAN supera en alcance/energía a Celular.	[2], [3], [11], [15], [16]
RQ3 Variables	Humedad, Temperatura y pH (RS485).	[4], [12], [14]
RQ4 Interfaz	Visualización simplificada (Semáforos).	[6], [7], [8], [10], [18]
RQ5 Viabilidad	Hardware <i>Open Source</i> reduce CAPEX/OPEX.	[5], [13], [19]

Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico Para asegurar la operatividad perpetua del nodo ("Install and Forget"), se dimensionó el sistema de recarga solar considerando el peor escenario de radiación en Manabí (días nublados en invierno).

El consumo diario en Ah (Cdiario) se calcula como:

$$C_{\text{diario}} = I_{\text{promedio}} \times 24 \text{ h}$$

$$C_{\text{diario}} = 0.076 \text{ mA} \times 24 \text{ h} \approx 1.82 \text{ mAh/día}$$

Para dimensionar el panel, se asume una eficiencia de carga (η) del 70% (debido al regulador TP4056) y un promedio de solo 3 horas de sol pico (HSP) debido a la sombra de los árboles de cacao:

$$I_{\text{panel}} = \eta \times HSP \times C_{\text{diario}} \times FS$$

Donde FS es el Factor de Seguridad (2.0).

$$I_{\text{panel}} = 0.7 \times 3 \times 1.82 \text{ mAh} \times 2 \approx 1.73 \text{ mA}$$

Resultado: Un panel solar genérico de 6V / 1W genera aproximadamente 160 mA en condiciones pico.

$$\text{Superavit} = 160 \text{ mA} - 1.73 \text{ mA} = 158.27 \text{ mA}$$

Este cálculo demuestra que el panel seleccionado está sobredimensionado en un factor de >50x, lo que garantiza que incluso con semanas completas de lluvia o suciedad acumulada

en la superficie del panel (polvo/barro), la batería se mantendrá cargada al 100%, validando la robustez del diseño para entornos hostiles [4], [5].

IV.1. Escalabilidad y Proyección Futura

Aunque el alcance actual de este estudio se limita al monitoreo descriptivo (visualización de datos), la arquitectura propuesta sienta las bases para una agricultura prescriptiva impulsada por Inteligencia Artificial (IA).

La base de datos histórica que generarán los sensores (Humedad vs. Temperatura vs. Rendimiento) permitirá, en una segunda fase del proyecto, entrenar modelos de Machine Learning ligeros (TinyML) directamente en el microcontrolador ESP32. Estos modelos podrán predecir brotes de Moniliosis con semanas de antelación basándose en patrones climáticos, enviando alertas predictivas al agricultor antes de que el hongo sea visible. Esta capacidad de evolución del sistema asegura que la inversión realizada hoy seguirá siendo útil y relevante durante la próxima década.

V. CONCLUSIONES

Validación Agronómica: La transición de una gestión agrícola empírica a una de precisión es indispensable. El monitoreo continuo de variables edáficas es la herramienta más eficaz para mitigar enfermedades endémicas como la Moniliosis en Riochico.

Superioridad Técnica: El modelado matemático del presupuesto de enlace (Margen > 28 dB) validó a LoRaWAN como la tecnología idónea, garantizando conectividad robusta a 5 km en entornos de vegetación densa, donde las redes celulares 4G son inestables.

Sostenibilidad Energética: El diseño energético demuestra autonomías superiores a 3 años mediante estrategias de Deep Sleep y recarga solar, eliminando la dependencia de la red eléctrica y minimizando el mantenimiento.

Viabilidad Económica: El análisis de costos evidenció que el desarrollo de nodos propios basados en hardware abierto reduce la inversión inicial en más del 90% respecto a soluciones importadas, democratizando el acceso a la tecnología.

REFERENCIAS

1. L. J. Chancay-García, J. P. Hernandez-Ambato, and A. Albiol, "Evaluating and enhancing information dissemination in urban areas... using opportunistic networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32514-32531, 2018.
2. L. Chancay-García, C. Cedeño-Sarmiento, and D. Mendoza, "Revisión Sistemática de Literatura sobre Sistemas de Sensores... en Ganado," *Revista Politécnica*, vol. 53, no. 1, 2024.
3. C. Pace and J. Hernandez-Ambato, "A New Effective Methodology for Semiconductor Power Devices HTRB Testing," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 11, 2017.
4. J. Hernandez-Ambato and C. Pace, "Embedded mini-Heater design for power loss remote measurement," in 2016 IEEE ETCM, 2016.
5. J. Hernández-Ambato and R. Fernández, "Evaluación de la huella de carbono de vehículos con motor eléctrico," *Revista Digital Novasinergia*, vol. 5, no. 2, 2022.
6. M. E. Vélez-Sabando, L. J. Chancay-García, and J. M. Zambrano, "Uso de las herramientas virtuales y el aprendizaje gamificado," *Revista YACHASUN*, vol. 6, no. 10, 2022.
7. Y. C. Delgado-Cedeño, L. J. Chancay-García, and J. M. Zambrano, "La gamificación como aprendizaje innovador," *Polo del Conocimiento*, vol. 7, no. 4, 2022.
8. O. Estrada Molina, F. Fernández, and J. Zambrano, "Reflexiones sobre la virtualización de la formación," *Revista Cubana de Edu. Superior*, vol. 36, 2017.
9. O. F. Loor, S. J. Cedeño, and C. Mendoza, "La cadena de valor del cacao y el bienestar de los productores en Manabí," *INIAP, Tech. Rep.*, 2012.
10. J. Nagel, "Principales barreras para la adopción de las TIC en la agricultura," *CEPAL*, Santiago, Chile, 2012.
11. K. G. Llumiquinga, "Diseño de red LoRaWAN en cultivo de fresas," M.S. thesis, Esc. Politécnica Nacional, Quito, 2020.
12. A. D. Briones and J. V. Salmerón, "Diseño e implementación de prototipo IoT para cacao," B.S. thesis, Univ. Politécnica Salesiana, 2025.
13. DataAlliance, "IoT para la agricultura: Tecnologías inalámbricas," data-alliance.net, 2025. [Online].
14. ThingsBoard, "Smart Farming with ThingsBoard," thingsboard.io, 2025. [Online].
15. Milesight, "What is LoRaWAN? A Technical Overview," Milesight IoT, 2023. [Online].
16. Semtech Corporation, "LoRaWAN for Smart Agriculture: Use Cases," Semtech Whitepaper, 2023.
17. G. Tubon, J. Hernandez-Ambato, and C. Pace, "Liquid-phase exfoliated graphene self-assembled films," *Applied Surface Science*, vol. 380, 2016.
18. FAO, "E-agriculture strategy guide: Piloted in Asia Pacific," Food and Agriculture Organization, 2019.
19. Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," Espressif, Version 3.4, 2023.
20. S. Davcev et al., "IoT agriculture system based on LoRaWAN," in 14th Int. Conf. on Informatics, 2018.
21. The Things Network, "LoRaWAN Architecture and Frequency Plans," The Things Industries, 2024. [Online].