

SOLUCIONES IOT PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS AGROPECUARIOS: CASOS DE LOMBRICULTURA, MELIPONARIO E INVERNADERO EN CAUCA

IOT SOLUTIONS FOR THE OPTIMIZATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS: CASES OF VERMICULTURE, MELIPON FARM AND GREENHOUSE IN CAUCA, COLOMBIA.

María Alejandra López Hurtado

Ingeniera en electrónica y telecomunicaciones, docente Universidad Nacional abierta y a distancia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0417-8557>

Email: alejandra.lopez@unad.edu.co

RESUMEN.

El uso de tecnologías IoT en el entorno agrícola y pecuario ha demostrado ser un facilitador clave para el monitoreo en tiempo real y la gestión eficiente de los sistemas productivos, alineándose con las demandas globales de sostenibilidad, precisión y competitividad. Este trabajo documenta la implementación y evaluación de sistemas de monitoreo IoT en tres sistemas productivos estratégicos para la región: una unidad de lombricultura, un invernadero y un apíario (meliponario) ubicados en la granja del SENA Cauca con participación de estudiantes de la Universidad Nacional abierta y a distancia. La solución tecnológica integró tres protocolos de comunicación inalámbrica —Sigfox, WiFi y LoRaWAN—, seleccionados por su complementariedad en cobertura, consumo energético y escalabilidad, lo que permite adaptarse a las condiciones heterogéneas de los entornos rurales.

Los diseños implementados incluyen sensores para el registro de variables críticas como temperatura, humedad, pH y actividad biológica, cuyos datos son procesados y visualizados en plataformas de gestión centralizada. Esta infraestructura tecnológica no solo optimiza el control de los procesos productivos, sino que también genera información valiosa para la toma de decisiones, reduciendo pérdidas y mejorando la calidad de los productos. La elección de tecnologías emergentes como LoRaWAN y Sigfox, junto con redes tradicionales como WiFi, refleja el potencial de la agricultura 4.0 para transformar la producción agropecuaria en Colombia, especialmente en contextos donde la conectividad y los recursos son limitados.

Finalmente, este trabajo subraya la importancia de la formación técnica y la adaptación tecnológica como pilares para la adopción de la agricultura

4.0 en el país, contribuyendo así a la modernización del sector agropecuario y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con la innovación, la producción responsable y la acción climática.

Palabras Clave.

Apicultura; invernadero; IoT; lombricultura; monitoreo; sensores

ABSTRACT.

The use of IoT technologies in the agricultural and livestock environment has proven to be a key enabler for real-time monitoring and efficient management of production systems, aligning with global demands for sustainability, precision and competitiveness. This paper documents the implementation and evaluation of IoT monitoring systems in three strategic productive systems for the region: a vermiculture unit, a greenhouse and an apiary (meliponarium) located in the SENA Cauca farm with the participation of students from the National Open and Distance University. The technological solution integrated three wireless communication protocols -Sigfox, WiFi and LoRaWAN-, selected for their complementarity in coverage, energy consumption and scalability, which allows adapting to the heterogeneous conditions of rural environments.

The implemented designs include sensors for recording critical variables such as temperature, humidity, pH and biological activity, whose data are processed and visualized in centralized management platforms. This technological infrastructure not only optimizes the control of production processes, but also generates valuable information for decision making, reducing losses and improving product quality. The choice of emerging technologies such as LoRaWAN and Sigfox, together with traditional networks such as WiFi, reflects the potential of agriculture 4.0 to transform agricultural production in Colombia, especially in contexts where connectivity and resources are limited.

Finally, this work highlights the importance of technical training and technological adaptation as pillars for the adoption of agriculture 4.0 in the country, thus contributing to the modernization of the agricultural sector and the fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDGs), especially those related to innovation, responsible production and climate action.

Keywords.

Beekeeping; greenhouse; greenhouse; IoT; vermiculture; monitoring; sensors

INTRODUCCIÓN.

Internet de las cosas se constituye en un nuevo paradigma que se ha integrado a distintos escenarios y áreas de conocimiento: la domótica, la salud, la meteorología, el entretenimiento y otras son ejemplos de esto. IoT ofrece grandes posibilidades y beneficios como entre los cuales se pueden mencionar el intercambio de información de forma rápida y en tiempo real, comunicación con el entorno directo, sistemas de seguridad, medios de transporte conectados, casas inteligentes, edificios inteligentes, fábrica digital (industria 4.0), procesos más sostenibles y ciudades conectadas. [1] Sin duda la agricultura es el sector de mayor potencial y proyección para esta integración: La agricultura inteligente es cada vez más importante para los agricultores de hoy en día, y será aún más fundamental en el futuro garantizar una expansión adecuada de los campos y una producción agrícola adecuada. Desafortunadamente, los métodos agrícolas tradicionales no están a la altura de satisfacer la creciente demanda. Como resultado, el suelo permanece estéril y carente de fertilidad debido a la mala utilización de nutrientes, gestión del agua, luz, fertilizantes y pesticidas. Las enfermedades de los cultivos, la escasez de agua, el riego y el control de pesticidas son solo algunos de los desafíos que los diferentes sistemas de control y automatización de IoT pueden abordar de manera eficiente. [2]

La lombricultura y la agricultura están estrechamente relacionadas pues esta técnica de compostaje que involucra el uso de lombrices de tierra para descomponer materia orgánica, como restos de alimentos y residuos vegetales, a través de un proceso biológico ofrece una forma sostenible de mejorar la calidad del suelo, proporcionando nutrientes de manera orgánica. La búsqueda de prácticas agrícolas sostenibles que restauren la salud del suelo y promuevan la seguridad alimentaria a largo plazo se ha convertido en una prioridad global. [3]

De esta manera, una de las implementaciones de IoT que mayor impacto tiene para todo el sector agrícola es en la lombricultura pues permite aprovechar materia orgánica generando un fertilizante natural rico en nutrientes y muy beneficioso para el suelo.

Este sistema de producción depende del estado de variables ambientales como la temperatura, humedad y pH del sustrato de las camas donde se alojan las lombrices; así como la luminosidad del entorno siendo estos los rangos ideales de operación:

Tabla 1. Variables del sistema de lombricultura

Variable	Rango
Temperatura	20º C – 25º C
Humedad	70% - 80%
pH	6.5 – 7.5
Luminosidad	Nula

Son estas entonces las magnitudes a monitorear mediante un sistema IoT pues valores por fuera de estos rangos representan condiciones adversas para la reproducción y supervivencia de las lombrices.

Por su parte los apíarios son fundamentales para la agricultura, la biodiversidad y la economía, además de ser vitales para la seguridad alimentaria y la conservación de los ecosistemas naturales. Las abejas desempeñan un papel fundamental en la polinización de cultivos y plantas silvestres; muchos de los cultivos alimentarios dependen en cierta medida de la polinización por insectos, principalmente abejas. También son importantes agentes en la conservación de la biodiversidad ya que ayudan a polinizar plantas silvestres y mantener la diversidad de flora en áreas naturales. A pesar de esto, este grupo de individuos han venido disminuyendo por los diferentes factores como: la degradación de los ecosistemas, el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad. [4]

Existen múltiples variables a analizar en los apíarios, pero las que se identifican con mayor relevancia son temperatura, humedad, sonido y peso, sin embargo determinar los valores óptimos puede variar según la ubicación geográfica, la época del año y las especies de abejas específicas. Se identifican algunos rangos generales que pueden considerarse como ideales para el buen funcionamiento y la salud de las colmenas:

Temperatura: Las abejas pueden tolerar una amplia gama de temperaturas, pero una temperatura estable alrededor de los 34ºC es favorable para la actividad de las abejas y el desarrollo de las larvas

Rango óptimo: Entre 32ºC y 35ºC en la zona de cría (donde se encuentra la reina y las larvas).

Humedad: Las abejas prefieren una humedad moderada y estable. Demasiada humedad puede favorecer el desarrollo de enfermedades, mientras que la falta de humedad puede dificultar la producción de cera y el desarrollo de las larvas.

Rango óptimo: Entre 50% y 60% de humedad relativa.

Sonido: El monitoreo del sonido puede ayudar a detectar cambios en la actividad de la colonia, como la presencia de una reina o la aparición de enjambres. No hay un valor numérico específico para el sonido, pero los cambios significativos en los patrones sonoros pueden indicar problemas o eventos importantes en la colmena.

Rango óptimo: Sonidos normales de una colonia activa.

Peso de la colmena: depende del tipo de colmena y la estación del año. El peso de una colmena sana puede variar considerablemente, pero los apicultores suelen observar aumentos de peso durante períodos de recolección de néctar y disminuciones durante períodos de escasez de recursos.

Los invernaderos, como tercer escenario son estructuras cerradas, generalmente construidas con materiales transparentes (vidrio, plástico), diseñada para controlar las condiciones ambientales y optimizar el crecimiento de plantas. Su objetivo principal es crear un microclima que permita el cultivo de especies fuera de temporada o en condiciones climáticas adversas.

Las variables críticas más comunes para los productores son Temperatura, Humedad relativa, Luz (radiación solar), CO₂, Nutrientes (suelo/agua), Ventilación. Los rangos pueden variar dependiendo del tipo de cultivo por ejemplo, para el caso de la temperatura que es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. [5]

Estos escenarios permiten el cultivo en zonas con climas extremos o limitaciones de suelo, aportan a la seguridad alimentaria pues aumenta la producción y la disponibilidad de alimentos durante todo el año.

Además, propicia la investigación en entornos educativos y posibilita la integración de tecnologías como sensores, IoT y automatización para optimizar recursos (agua, energía).

METODOLOGÍA.

El trabajo corresponde a una investigación aplicada con enfoque mixto (cuantitativo-cuantitativo), centrada en el diseño, implementación y evaluación de prototipos IoT. La metodología que se sigue tiene un enfoque secuencial y aplicado, orientado a que las soluciones propuestas

fueran técnicas, viables y adaptadas a las necesidades específicas de los sistemas productivos agropecuarios estudiados.

La figura 1 describe la metodología con sus 3 fases que se han aplicado de manera iterativa en la atención de cada unidad productiva:

Parte de la identificación de las condiciones iniciales, necesidades y restricciones de los sistemas productivos (lombricultura, meliponario e invernadero), así como las tecnologías disponibles y pertinentes para su monitoreo y automatización.

Posteriormente se desarrolla una arquitectura técnica que integrara sensores, redes de comunicación y plataformas de gestión, optimizada para los sistemas productivos seleccionados.

Y finalmente, se despliegan los sistemas diseñados en los entornos reales de producción, evaluar su desempeño y recopilar datos para análisis posteriores.

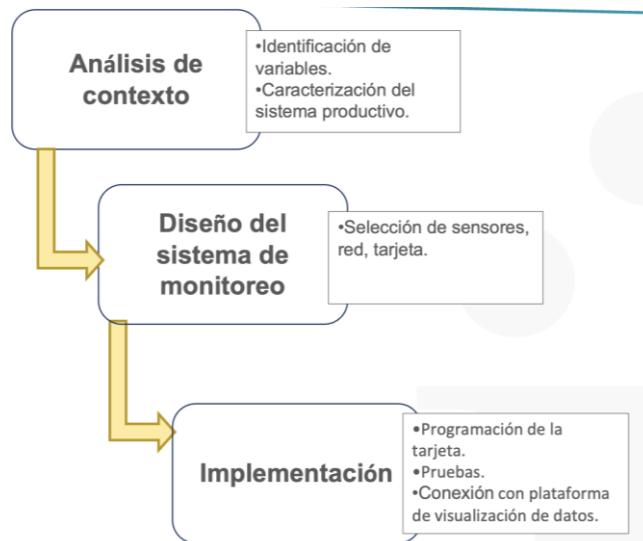


Figura 1. Fases de la metodología

RESULTADOS.

Considerando las variables de interés en los sistemas de producción de lombricultura, invernadero y apicultura se determina que es necesario sensores que permitan monitorear permanentemente las variables y entregar información confiable, consistente y accesible al usuario final, respetando las características comunes de operación de un sistema IoT: heterogeneidad, bajo consumo de corriente y minimización de hardware. Se presentan tres soluciones IoT implementadas para tres escenarios: la unidad de lombricultura y el apiario del centro agropecuario del Sena Regional Cauca, diseñadas con dos tecnologías de comunicación diferentes.

A. Solución basada en Sigfox para la unidad de lombricultura

La tecnología Sigfox 0G es un protocolo de red de área amplia de baja potencia (LPWA) propiedad de UnaBiz. Está diseñado para conectar sensores y dispositivos de forma segura a bajo costo y de la manera más eficiente desde el punto de vista energético para permitir IoT masivo. [6] Sigfox opera su propia red global, que abarca múltiples países y regiones conectando más de 11 millones de dispositivos [6] según la arquitectura que se ilustra en la Figura 2 que integra los dispositivos finales (conectados a los “objetos” o “cosas”), los cuales se comunican directamente con las estaciones base de la red propietaria, encargada a su vez de enviar y recibir los datos captados por los sensores/actuadores hasta el cloud Sigfox que se conecta con las plataformas de visualización de datos donde interactúa el usuario final.



Figura 2. Arquitectura Sigfox [2]

Se elige esta tecnología por las particularidades que inicialmente se presentaban en la unidad productiva de interés en donde no se contaba con conectividad ni puntos de alimentación eléctrica. Se analiza la cobertura en el lugar de implementación encontrando que era factible el despliegue de una solución sobre Sigfox dado la presencia de red en el punto de interés lo que representa una característica determinante en relación a minimizar hardware y simplificar la solución. La solución consiste en un arreglo de sensores (2 de temperatura, 2 de humedad y 1 de luminosidad)¹ , conectados a una tarjeta Soul ONE que se comunica directamente al backend propietario, que a su vez se enlaza con una plataforma en la nube diseñada para el desarrollo y la implementación de aplicaciones IoT, denominada Ubidots, que permite visualizar la información proveniente de la cama de lombrices en tiempo real y tomar decisiones basadas en los datos generados como se muestra en la figura 3.

¹ Sensor de temperatura: Ds18b20, sensor de humedad: módulo HD-38, sensor de luminosidad: Fotorresistencia tipo LDR convencional.

Analizadas las condiciones del sistema de producción se descarta como variable crítica el pH por el tratamiento previo que el personal realiza sobre la materia orgánica y por el alto costo de los sensores para esta magnitud.

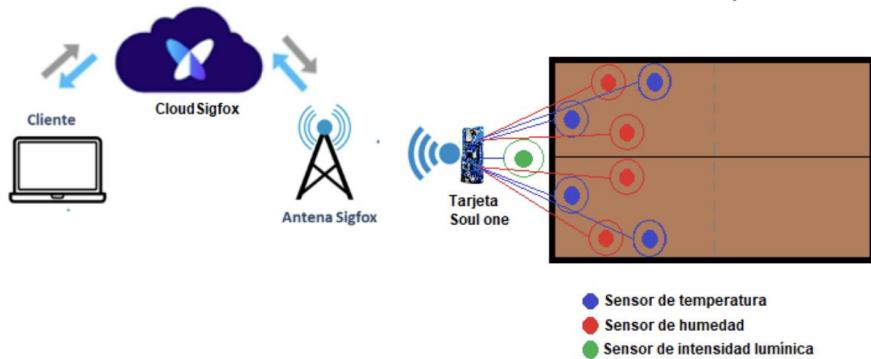


Figura 3. Solución basada en Sigfox

El sistema se implementó satisfactoriamente en términos de consistencia, periodicidad y fiabilidad de los datos obtenidos pues Sigfox está diseñado para transmitir pequeñas cantidades de datos; así como la visualización y el envío de alertas simuladas para circunstancias adversas al usuario final conduciendo al logro de los objetivos propuestos. Sin embargo, aunque Sigfox ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia energética y conectividad de baja potencia para soluciones de monitoreo IoT, tiene algunas desventajas que debieron ser consideradas para el mantenimiento del sistema a largo plazo y para la réplica de la solución en entornos rurales como son los costos asociados con la adquisición de las tarjetas de conectividad y principalmente, el costo de suscripciones a la red, considerando que estos sistemas de producción son de gran valor para la sostenibilidad y proyección de las unidades productivas de la región, que en su mayoría se ubican en zonas apartadas y sobre infraestructuras básicas; por tanto deben ser soluciones económicas y accesibles para todos los productores, buscando la mayor eficiencia.

B. Solución basada en LORA para la unidad de apicultura

LoRaWAN es un protocolo de red de área amplia y baja potencia (LPWA) diseñado para conectar de forma inalámbrica "cosas" (que funcionan con baterías) a Internet en redes regionales, nacionales o globales, y se enfoca en los requisitos clave de Internet de las cosas (IoT) como comunicación bi-direccional, seguridad de extremo a extremo, movilidad y servicios de localización. Se implementa bajo topología de estrella extendida en la que las puertas de enlace transmiten mensajes entre los dispositivos finales y un servidor de red central. Las puertas de enlace están conectadas al servidor de la red a través de conexiones IP estándar y actúan como un puente transparente, simplemente convirtiendo paquetes de RF en paquetes de IP y viceversa. La comunicación inalámbrica aprovecha las características de largo alcance de la capa física de LoRa, lo que permite un enlace de un solo salto entre el dispositivo final y una o varias puertas de enlace.

La red LoRa consta de los siguientes elementos:

- Dispositivos clientes o Finales: Estos son los dispositivos utilizados para la conexión de objetos como sensores, medidores y demás a la red LoRa. Este tipo de elementos se encargan de transmitir la información recolectada a los Gateway o pasarelas de la red.
- Gateway o pasarela: Son estaciones base encargadas de recibir la información transmitida por los dispositivos clientes, y reenviarla a los servidores de red
- Servidores de red: Son equipos locales o en la nube encargados de la recepción y procesamiento de la información proveniente de los nodos finales, y de la configuración de red y gestión de los dispositivos conectados a la misma. [7]. La disposición típica de los componentes se ilustra en la Figura 3.

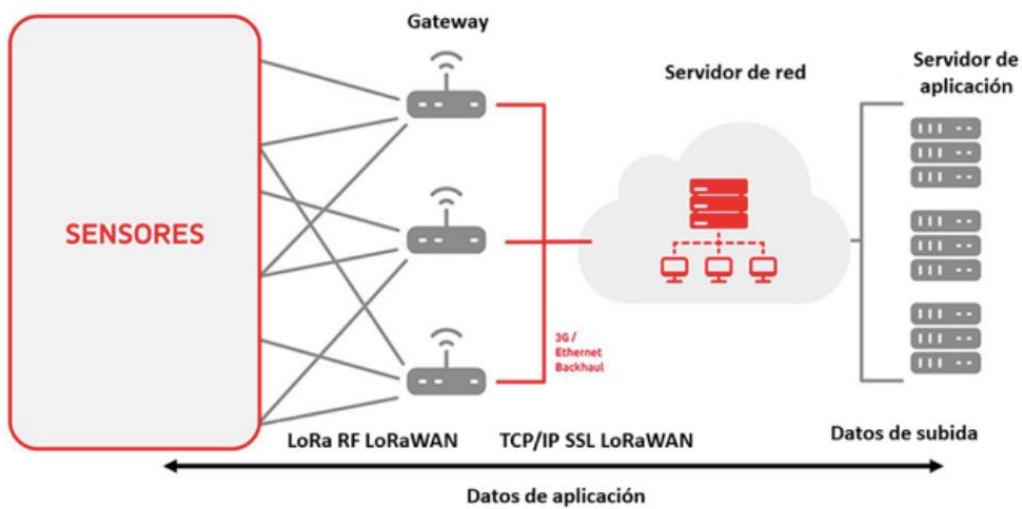


Figura 4. Arquitectura basada en Lora WAN

La solución se implementa usando la Gateway Dragino DLOS8 que cuenta con un módulo de transmisión LoRa y que redirige la información entre Internet y los nodos que se conectan a este dispositivo y viceversa. Esta permite conectar una red inalámbrica LoRa a una red IP a través de WiFi, Ethernet o móvil 3G/4G; para el caso se implementó a través de un puerto Ethernet. Hasta ahora se ha realizado la configuración de la pasarela, su registro en el portal The Thing network que se define como un ecosistema colaborativo global de Internet de las Cosas que crea redes, dispositivos y soluciones utilizando tecnología LoRaWAN. Es en sí misma una comunidad que tiene registrados aproximadamente 9000 gateways y más de 80.000 usuarios. Los gateways están distribuidos por todo el mundo; es necesario vincular el dispositivo a un servidor para comunicar los sensores con la internet. Se ha configurado y vinculado a la pasarela el

sensor LSN50v2-S31 que monitorea la temperatura del entorno y la humedad relativa del aire.

Características:

- salida digital con compensación de temperatura
- fijado en una carcasa anti condensación impermeable para uso a largo plazo.
- admite la función de alarma de temperatura y humedad (el usuario puede recibir una alarma para recibir un aviso instantáneo)
- funciona con una batería Li-SOCI2 de 8500 mAh y está diseñada para un uso prolongado de hasta 10 años. dependiendo del entorno de uso y del período de actualización) Se encuentran en proceso de selección y adquisición los sensores de ruido y peso, considerando que deben ser compatibles con LORA.

También se ha generado un Manual de uso con la descripción del paso a paso de configuración de los componentes, la vinculación al servidor TTN, de los sensores y la visualización de datos.

C. Solución de invernadero usando un sistema fotovoltaico.

La implementación en el invernadero se encuentra en la fase de diseño conceptual y técnico y se asemeja a los casos descritos en A y B en cuanto al análisis de la dinámica de la unidad productiva, las variables críticas y las necesidades de los productores; a partir de esto se determinan los sensores, tarjeta y tecnología de conexión que se va a utilizar. La característica diferenciadora corresponde a la integración de un sistema de generación solar fotovoltaica que proporcione el suministro autónomo de energía, reduciendo dependencia de la red eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos se integran de manera óptima con las soluciones IoT agrícolas debido a su complementariedad técnica, sostenibilidad y eficiencia operativa. En primer lugar, la generación de energía solar es ideal para alimentar dispositivos IoT como sensores, actuadores y gateways, que suelen operar en ubicaciones remotas o rurales donde el acceso a la red eléctrica es limitado o costoso; esto garantiza una autonomía energética que reduce la dependencia de fuentes convencionales y minimiza los costos operativos a largo plazo. Además, la escalabilidad de los sistemas fotovoltaicos permite adaptar la capacidad de generación según la demanda del sistema IoT, ya sea para un pequeño invernadero o una red de sensores distribuidos en grandes extensiones. Por otro lado, la sostenibilidad ambiental es un factor clave: al combinar IoT con energía solar, se reduce significativamente la huella de carbono de las operaciones agrícolas, alineándose con los principios de la agricultura 4.0 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Se realizó un estudio de consumo energético estimado para dimensionar el sistema fotovoltaico, considerando las necesidades de iluminación, sensores, bombas de riego y sistemas de ventilación. Se evaluaron diferentes tecnologías de paneles solares y sensores IoT, priorizando eficiencia, costo y compatibilidad con el ecosistema tecnológico existente. El diseño incluye la conexión de sensores a una plataforma centralizada, que permitirá la recolección, análisis y visualización de datos en tiempo real como en los otros dos escenarios.

CONCLUSIONES.

Se implementa un sistema de monitoreo basado en IoT mediante un arreglo de sensores de temperatura, humedad y luminosidad seleccionados a partir de sus características físicas y operacionales, que se ubican en puntos específicos de las camas para cubrir toda el área de interés. Se utilizan dos tecnologías de red buscando optimizar la solución de conectividad para que sea acorde a las condiciones de los productores rurales que se ubican en zonas alejadas o con escasa infraestructura tecnológica.

La agricultura de precisión es un campo interdisciplinario con gran auge y potencial teniendo en cuenta el amplio campo de acción con que cuenta; allí, los sistemas de monitoreo basados en IoT representan una importante línea de trabajo a nivel regional pues tradicionalmente la agricultura ha sido el principal renglón económico del sector y, por lo tanto, estos sistemas resultan replicables para las zonas rurales donde se ubican los productores siempre y cuando se tengan en cuenta las variables de despliegue como cobertura de la red, costo, compatibilidad.

Comparando las tecnologías de red Sigfox y Wifi se establece que resulta más conveniente para las condiciones de los entornos agrícolas usar redes con mayor despliegue como las Wifi pues estas son más económicas y factibles en ciertos escenarios. Sigfox por su parte presenta ventajas significativas relacionadas por ejemplo con la banda estrecha que emplea que permite una mejor utilización del espectro de frecuencia, lo que conlleva a una mayor capacidad de la red. Así mismo opera en varios países y regiones, lo que brinda la posibilidad de tener una cobertura global y es muy seguro por operar su propia red. La principal ventaja se relaciona con la simplicidad en la implementación pues ofrece un enfoque sencillo para la conectividad IoT; sin embargo todas estas condiciones no se acogen a las características de los productores de la región.

El monitoreo de apíarios utilizando tecnología de Internet de las Cosas (IoT) es cada vez más importante por varias razones, especialmente considerando los desafíos actuales que enfrenta la apicultura, como el declive de las poblaciones de abejas, enfermedades, cambios climáticos y la necesidad de optimizar la producción de miel.

El diseño del invernadero con sistema de energía fotovoltaica representa un avance significativo en la integración de tecnologías limpias y soluciones IoT para la optimización de sistemas productivos agropecuarios. Los avances logrados en la fase de diseño demuestran el potencial de combinar energías renovables con la agricultura de precisión, no solo para mejorar la eficiencia productiva, sino también para reducir el impacto ambiental y los costos operativos.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Y. Salinas Anaya, D. Galván Rodríguez, I. Guzmán Prince y J. Orrante Sakanassi, «El impacto del internet de todas las cosas (IoT)en la vida cotidiana,» *Ciencia Latina*, vol. 6, nº 2, pp. 1369-1378, 2022.
- [2] H. Kolivand, B. M. Fern, T. R. M. Saba y A. Rehman, «A New Leaf Venation detection technique for Plant Species Classification,» ,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, , vol. 44, nº 4, pp. 3315-3327 , 2019.
- [3] D. Mendoza Intriago, V. Mero Rosado, A. Arteaga y Byron, «Influencia del humus de lombriz en la calidad de los suelos agrícolas: un estudio de caso,» *Revista Didáctica y Educación*, vol. 15, nº 3, pp. 388-404, 2024.
- [4] Y. Puentes y L. Saavedra, «Abeja: conservación e importancia ecológica,» *Educación y Ciencia*, nº 21, pp. 543-553, 2018.
- [5] J. Jaramillo Noreña, V. P. Rodríguez, P. A. Aguilar Aguilar y J. F. Restrepo, «CONTROL CLIMÁTICO BAJO CONDICIONES PROTEGIDAS,» de *TECNOLOGÍA PARA EL CULTIVO DE TOMATE BAJO CONDICIONES PROTEGIDA*.
- [6] Sigfox, «Sigfox 0G Technology,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.sigfox.com/what-is-sigfox/>.
- [7] M. Román, M. Martínez y A. Pantoja, *Manual de Compostaje del Agricultor Experiencias en América Latina*, " Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Santiago de Chile, 2013.: FAO, 2013.