

Universidad Nacional
Sistema de Estudios de Posgrado (SEPUNA)
Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales (CINAT)
Maestría en Apicultura Tropical (MAT)

Aplicación de Internet de las Cosas en Meliponicultura:
Prototipo de Colmena Inteligente para Meliponicultura (CIM).

Fulvio Alonso Lizano Madriz

Heredia, Costa Rica, noviembre, 2023

Trabajo presentado para optar al grado de Máster en Apicultura Tropical. Cumple con los requisitos establecidos por el Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional.
Heredia. Costa Rica.

Universidad Nacional
Sistema de Estudios de Posgrado (SEPUNA)
Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales (CINAT)
Maestría en Apicultura Tropical (MAT)

Aplicación de Internet de las Cosas en Meliponicultura:
Prototipo de Colmena Inteligente para Meliponicultura (CIM).

Fulvio Alonso Lizano Madriz

Heredia, Costa Rica, noviembre, 2023

Trabajo presentado para optar al grado de Máster en Apicultura Tropical. Cumple con los requisitos establecidos por el Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional.
Heredia. Costa Rica.

Tutores/ Asesores:

Eduardo Herrera González, M.Sc.

Mario Gallardo Flores, M.Sc.

Este trabajo fue realizado bajo el auspicio del Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales (CINAT) de la Universidad Nacional de Costa Rica.

Agradecimientos

Deseo agradecer a los funcionarios y profesores del CINAT que me acompañaron en este proceso que ha sido muy gratificante. En especial, la gratitud a mis asesores Eduardo Herrera González y Mario Gallardo Flores quienes me facilitaron y proporcionaron importantes insumos y orientación a lo largo del proceso.

Especialmente quiero agradecer al Prof. Pedro Leiva, Profesor de la UNED quien me apoyó irrestrictamente en el desarrollo del prototipo protagonista de esta investigación. Junto a Pedro, he descubierto un insospechado campo de desarrollo profesional en mi carrera académica, mismo que me llena de esperanza y motivación. ¡Muchas gracias Pedro!

Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros de promoción Alberto, Bredy, Carmen, Diana, Emanuel y Fabiana, quienes con su juventud y carácter han sido la jalea real que ha avivado esta etapa tan especial de mi vida.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a tres mujeres muy especiales en mi vida.

Primero, al culminar este arduo pero gratificante camino académico, deseo dedicarte esta investigación querida hija Pamela. Tu presencia y apoyo han sido el faro que ha iluminado mi sendero a lo largo de los años. Tú, mi amada hija, has sido mi mayor motivación, mi inspiración constante, y la razón para no rendirme. A través de este logro, deseo honrar no solo mi esfuerzo, sino también el impacto que has tenido en mi vida.

Segundo, con la más dulce de las gratitudes y el más profundo amor, también dedico esta investigación a Julia, la reina de mi colmena quien ha sido mi inspiración constante en este maravilloso mundo de las abejas. Tu presencia en estos últimos años de mi vida ha sido la chispa que ha avivado mi pasión, tu sabiduría ha sido mi faro y tu fortaleza, mi guía.

Finalmente, la dedicatoria más importante de todas:

ESTE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN ESTÁ DEDICADO A LA MEMORIA DE MI QUERIDA "MAMI". AL IGUAL QUE CON "PAPI", ME DETASTE DURANTE ESTE OTRO PERIODO DE ESTUDIOS, PERO DE LA MISMA FORMA, TU EJEMPLO DE PERSEVERANCIA Y TENACIDAD ESTÁ PRESENTE EN CADA TRAZO DE LO QUE ABUÍ ESTÁ ESCRITO.



Resumen

Este documento reporta los resultados de una investigación realizada con el objetivo de explorar la aplicación de la tecnología conocida como Internet de las cosas (IoT) en la meliponicultura. La investigación se centró en el desarrollo de un prototipo funcional de un dispositivo IoT para ser instalado en una colmena de abejas “Mariola” (*Tetragonisca angustula* - Latreille, 1811). Para guiar la investigación, se formuló una pregunta de investigación para ver qué elementos de la tecnología IoT podrían ser relevantes para ser aplicados en la meliponicultura en Costa Rica. El objetivo principal formulado para responder a esta pregunta de investigación fue establecer la necesidad de desarrollar un prototipo de aplicación funcional de IoT. Los principales hallazgos de esta investigación se expresan en forma de experiencias sobre el prototipo que se construyó. Se determinaron que aspectos prácticos se debían de tener en cuenta para desarrollar este tipo de prototipos. El proceso de investigación se logró en primer lugar a través de una revisión de la literatura sobre experiencias similares. En segundo lugar, se exploró la percepción de meliponicultores e investigadores sobre los principales aspectos a considerar para construir un prototipo de IoT. Finalmente, con estos insumos se construyó el prototipo. El prototipo resultante fue revisado luego con varios procesos de validación para concluir que dicho prototipo es un ejemplo válido de cómo aplicar la tecnología IoT en la meliponicultura en Costa Rica.

Abstract

This document reports the results of a research made in order to explore the application of the technology known as Internet of things (IoT) in meliponiculture. The research focused on the development of a functional prototype of an IoT device to be installed in a “Mariola” (*Tetragonisca angustula* - Latreille, 1811) bee hive. To guide the research, a research question was formulated to see which elements of IoT technology could be relevant to be applied at meliponiculture in Costa Rica. The main aim to answer this research question was to establish the need to develop a functional IoT application prototype. The main findings of this research are in the form of experiences about the prototype that was built. Practical matters to be taken into consideration to develop this kind of prototypes were determined. The research process was achieved firstly through a literature review on similar experiences. Secondly, meliponiculturists and researchers' perception on the main aspects to be considered to build a IoT prototype was explored. Finally, with these inputs the prototype was built. The resulting prototype was tested with several validation processes to conclude that such prototype is valid example of how to apply IoT technology in meliponiculture in Costa Rica.

Índice

I. INTRODUCCION.....	1
Antecedentes	1
Preguntas de investigación	2
Justificación.....	3
Objetivos	4
II. MARCO TEORICO.....	5
Objetivos de la Investigación de IoT en Meliponicultura	5
Elementos de Entorno de Aplicación de IoT en Meliponicultura	5
Componentes de IoT Normalmente Utilizados.....	6
Resultados Obtenidos en la Aplicación de IoT en Meliponicultura	7
III. MATERIALES Y METODOS.....	9
Revisión de Literatura	9
Encuesta	9
Prototipado	10
Análisis de datos	12
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
Literatura consultada	13
Encuesta de percepción	13
Prueba del prototipo.....	15
Generalidades del prototipo.....	15
Protección de los sensores del prototipo	17
Funcionamiento operativo del prototipo	19
Costo del prototipo	27
V. CONCLUSIONES	28
VI. RECOMENDACIONES	30
VII. BIBLIOGRAFIA	31
VIII. APENDICES	35
Apéndice 1, Componentes de IoT localizados en la literatura consultada	35
Apéndice 2, Consideraciones prácticas de técnicas de investigación utilizadas.....	37
Apéndice 3, Listado de literatura resultante de la revisión de literatura.....	38
Apéndice 4, Formulario de encuesta utilizado.....	39

Lista de Tablas

TABLA NO. 1. PRUEBAS T-STUDENT REALIZADAS CON EL PTFE COLOCADO	19
TABLA NO. 2. COSTOS DEL PROTOTIPO POR ELEMENTO	27

Lista de Figuras

FIGURA NO. 1. TIPO DE ABEJA Y COLMENA REFERIDO EN LA LITERATURA CONSULTADA (ADAPTADO DE YUWEI (2019) (A) Y HALIM ET AL. (2020, MAY) (B)	6
FIGURA NO. 2. UBICACIÓN PLANEADA VS. UBICACIÓN DEFINITIVA DEL PROTOTIPO.....	10
FIGURA NO. 3. ARQUITECTURA DEL PROTOTIPO	11
FIGURA NO. 4. DETALLE DE SENSORES UTILIZADOS.....	11
FIGURA NO. 5. PROTOTIPO INSTALADO	12
FIGURA NO. 6. PERCEPCIÓN SOBRE EL NIVEL DE IMPORTANCIA DE DIFERENTES ASPECTOS PARA LA MELIPONICULTURA	14
FIGURA NO. 7. PROTOTIPO INSTALADO E IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES.	16
FIGURA NO. 8. PRUEBA DE PROPOLIZACIÓN.	18
FIGURA NO. 9. SENSORES DE TEMPERATURA/HUMEDAD EXTRAÍDOS DE LA COLMENA LUEGO DE 3 SEMANAS DE PRUEBA.	20
FIGURA NO. 10. FÓRMULAS PARA CÁLCULO DE OPERATIVIDAD DE SENSORES.	21
FIGURA NO. 11. FÓRMULAS PARA CÁLCULO DE PUNTO DE ROCÍO	22
FIGURA NO. 12. PROMEDIOS DE PUNTO DE ROCÍO Y TEMPERATURA POR CADA SENSOR	23
FIGURA NO. 13. PUNTO DE ROCÍO Y TEMPERATURAS PARA DIVERSOS SENSORES (TEMPERATURA EN COLOR NEGRO).....	24
FIGURA NO. 14. DIAGRAMA DE BIGOTES PARA LOS SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD	24
FIGURA NO. 15. LECTURAS DE UV Y LUMINOSIDAD	25
FIGURA NO. 16. CONTRASTE DE TIEMPO APROXIMADO PARA AMANECER/ANOCHECER (● PARA CALCULADORA, □ PARA TIEMPO REGISTRADO POR EL SENSOR)	25
FIGURA NO. 17. REGISTRO DE SENSOR DE CALIDAD DEL AIRE.	26
FIGURA NO. 18. RESULTADOS DE PRUEBA DE APLICACIÓN DE HUMO AL SENSOR DE CALIDAD DE AIRE.	26

I. INTRODUCCION

En esta sección se abordan los antecedentes de la investigación, las preguntas de investigación, la justificación y los objetivos. Iniciamos con algunos antecedentes que contextualizan la relevancia del trabajo hecho.

Antecedentes

La meliponicultura consiste en la cría y manejo de abejas sin aguijón. Las abejas nativas sin aguijón (ANSA) (Apidae: Meliponini) son en gran medida el grupo más grande de abejas eusociales que existen con más de 500 especies. Hoy en día, la gran mayoría de las especies de abejas sin aguijón se encuentran en el Neotrópico, donde representan una gran diversidad taxonómica (Hrncir et al., 2016).

Es una práctica que se desarrollaba de forma ancestral por grupos indígenas y actualmente es una importante actividad económica además de un referente cultural muy presente hoy en día. Las características de las mieles producidas por las abejas sin aguijón no solo son utilizadas en la alimentación humana, sino que también están siendo investigadas para aplicaciones interesantes desde el punto de vista medicinal y terapéutico (Herrera y Aguilar-Monge, 2019).

No obstante la relevancia de la meliponicultura, el estado actual de la investigación científica en la meliponicultura es muy limitado. Un simple ejercicio de búsqueda en Google Académico arrojó 660000 resultados para una búsqueda simple del término “apiculture” mientras que, para el caso de “meliponiculture” en la misma base de datos, solo se obtuvieron 2520 resultados (un 0,03% con respecto a los resultados de la búsqueda hecha en apicultura). Este hecho es preocupante debido a la particular y compleja problemática que tienen las abejas sin aguijón en este momento respecto a la disminución de su número (Arnold et al., 2018), y a la necesidad de comprender mejor las potencialidades de estos insectos para mejorar su tecnificación y manejo (May-Itzá et al., 2022).

Para incrementar la investigación y mejora productiva de la meliponicultura se deben implementar acciones innovadoras que utilicen herramientas emergentes como lo es el caso de la utilización de tecnología de información en la forma de lo que se conoce como Internet de las Cosas, conocida de aquí en adelante como IoT por sus siglas en inglés.

Según Rose et al. (2015), se puede entender IoT como el conjunto de escenarios donde la conectividad de las redes de comunicación y la capacidad computacional se extienden a objetos,

sensores y elementos cotidianos que normalmente no se consideran computadoras, lo cual permite que estos dispositivos generen, intercambien y consuman datos con una intervención humana mínima. Múltiples estudios reportan la aplicación de IoT en agricultura (Abbasi et al., 2019; Daoliang y Hao, (2018); Kour y Arora, 2020). En apicultura también es posible encontrar en la literatura múltiples reportes de aplicaciones específicas de esta tecnología (Kontogiannis, 2019; Mahamud et al., 2019; Ochoa et al., 2019). En el caso de las abejas sin aguijón también existen, aunque en menor medida, algunas investigaciones y prácticas de implementación de IoT. Por ejemplo, Ali et al. (2021) desarrollaron una investigación en *Heterotrigona itama* (Cockerell, 1918) para explorar factores que afectan a este tipo de abejas como la temperatura ambiental, la humedad ambiental y los depredadores. Adicionalmente, la aplicación de IoT para meliponicultura llamada “MUS-Tracker” fue descrita como un sistema integrado inalámbrico de monitoreo de abejas sin aguijón que permite recopilar datos del peso del recipiente de miel, la temperatura dentro de la colmena, la humedad dentro de la colmena, la temperatura del ambiente fuera de la colmena, la humedad del ambiente fuera de la colmena y las actividades de las abejas. (Man et al., 2020). Estos antecedentes muestran propuestas de investigación y práctica hechas en el extranjero, especialmente Malasia, con un determinado y reiterativo tipo de elementos de tecnología (mismos sensores) y sin una exploración o contextualización de las necesidades reales de la actividad. En el caso de Costa Rica, para el desarrollo de esta investigación no fue posible encontrar registros en literatura publicada sobre el tema en estudio.

Preguntas de investigación

Este Trabajo Final de Graduación (TFG) tenía el propósito de contestar una pregunta de investigación general y tres específicas. La pregunta de investigación general del TFG es:

¿Cómo determinar los principales elementos de IoT que puedan ser útiles para el desarrollo de un prototipo de aplicación de esta tecnología adaptada a la realidad de Costa Rica?

Las preguntas de investigación específicas fueron:

1. *¿Cuáles elementos de IoT son relevantes para ser aplicados en un contexto como el de la meliponicultura en Costa Rica?*
2. *¿Qué características debería tener un prototipo de aplicación de IoT para una colmena de abejas sin aguijón?*
3. *¿Qué consideraciones de funcionalidad tiene un prototipo de aplicación de IoT para un contexto como el utilizado para la prueba a desarrollar?*

Justificación

La meliponicultura es una actividad que tiene múltiples problemas. Por ejemplo, Arnold et al. (2018) reportaron un importante declive en la actividad después de la introducción de las abejas melíferas además de la pérdida de importantes conocimientos ancestrales sobre el manejo de este tipo de insectos. Adicionalmente, en el caso de Costa Rica, Mora et al. (2021) reportaron el uso de agroquímicos, el cambio de la cobertura de suelo, diversas prácticas agrícolas y la fragmentación del paisaje por actividades agropecuarias y ganaderas, como grandes problemáticas del manejo de las abejas sin aguijón. La fragilidad de estos insectos hace que requieran cuidados especiales. Por ejemplo, en el caso del Jicote gato (*Melipona beecheii* - Bennett, 1831), son un tipo de abejas que debido a sus preferencias de habitat, son especialmente susceptibles en áreas disturbadas lo que ha generado un importante descenso en su número. Finalmente, una combinación de factores negativos como la deforestación, la competencia por recursos con las *Apis mellifera* (Linnaeus, 1758), el inadecuado manejo por parte de personas sin experiencia y la excesiva extracción de miel son aspectos que afectan a la meliponicultura. (Ramírez, 2021)

En meliponicultura, al igual que en otras actividades agroindustriales, se ha iniciado una tendencia a buscar el uso de elementos de tecnología de información en la forma de, principalmente, tecnología IoT. Esta tecnología podría tener un impacto positivo no solo desde el punto de vista de la explotación económica. Desde el punto de vista de la investigación, también se han implementado experiencias que permiten, por medio de componentes de IoT, mejorar las investigaciones en este tipo de abejas al contar con una sistematización mas efectiva y precisa de la recolección de datos relacionados con la biología de estos insectos.

Considerando estas necesidades, se plantea un problema de investigación relacionado con cómo determinar qué elementos de IoT sería interesante considerar para desarrollar un prototipo de aplicación de esta tecnología en la meliponicultura en Costa Rica.

Objetivos

Con el fin dar respuesta a las preguntas de investigación, en este TFG se definieron un objetivo general y tres específicos. El objetivo general es:

Desarrollar un prototipo de aplicación de IoT utilizando referentes teórico-práctico y la percepción de los problemas actuales de la meliponicultura con el fin de adaptar la aplicación de esta tecnología al contexto de la meliponicultura en Costa Rica.

Los objetivos específicos son:

- 1. Investigar los referentes teóricos de la aplicación de IoT en meliponicultura por medio de una revisión sistemática de literatura, con el fin de dar sustento teórico a la investigación.*
- 2. Indagar cuales son los principales problemas presentes en la meliponicultura en Costa Rica por medio de un estudio de percepción con meliponicultores e investigadores, para contextualizar los principales problemas presentes en la actividad.*
- 3. Desarrollar un prototipo de solución de IoT por medio de la implementación en una colmena con sensores y dispositivos de comunicación para recolectar datos de prueba que permitan evaluar la funcionalidad del prototipo y determinar trabajos futuros a desarrollar.*

II. MARCO TEORICO

A continuación, se presenta el marco teórico de este TFG. Este marco teórico se obtiene de la aplicación de una de las técnicas de investigación utilizadas en esta investigación (revisión sistemática de literatura). Los detalles de cómo se aplicó esta técnica se presentan en el capítulo III. El marco teórico está estructurado de forma tal que presenten los referentes teóricos de la aplicación de IoT en meliponicultura y con esto, se pueda ayudar a determinar cuales aspectos de dicha tecnología puedan ser relevantes para el desarrollo de un prototipo de IoT en meliponicultura. Considerando lo anterior, la literatura seleccionada se presenta en cuatro secciones a saber: objetivos de la investigación de IoT en meliponicultura, elementos de entorno de aplicación de IoT en meliponicultura, componentes de IoT normalmente utilizados y, finalmente, resultados obtenidos en la aplicación de IoT en meliponicultura.

Objetivos de la Investigación de IoT en Meliponicultura

La mayoría de los objetivos definidos para las investigaciones consultadas está relacionado con establecer mecanismos de monitoreo en colmenas de abejas nativas sin aguijón a nivel interno o externo (Anuar et al., 2019, June; Anuar et al., 2021, March; Miskon et al., 2022; Tashakkori et al., 2021). Otros estudios se han enfocado en utilizar IoT para evaluar aspectos de la colmena relacionados con el entorno. (Ali et al., 2021; Halim et al., 2020, May; Yunus et al., 2017). Finalmente, otros investigadores se han enfocado en presentar una aplicación de tecnología IoT diseñada para rastrear colmenas que han sido robadas. (Anuar et al., 2019, June).

Elementos de Entorno de Aplicación de IoT en Meliponicultura

Todos los estudios incluidos en esta revisión de literatura excepto Tashakkori et al. (2021) fueron desarrollados en Malasia. De forma más específica, uno de los elementos de contextos identificados en la literatura estaba relacionada con una ubicación geográfica en particular. Por ejemplo, la mayoría de las investigaciones se realizó en instalaciones universitarias. (Anuar et al., 2019, June; Anuar et al., 2021, March; Halim et al., 2020, May; Tashakkori et al., 2021; Yunus et al., 2017).

Algunos de estos estudios también establecían un contexto relacionado con actividades humanas tal como las actividades de granjeros (Miskon et al., 2022) y la meliponicultura (Ali et al., 2021), ambos casos en Malasia.

Finalmente, el tipo de abeja, tipo y cantidad de colmenas utilizadas también fue un referente de contexto identificado en la literatura. La mayoría de las investigaciones (Ali et al., 2021; Anuar et al., 2021, March; Halim et al., 2020, May; Miskon et al., 2022; Yunus et al., 2017) utilizaron la abeja *Heterotrigona itama* – Cockerell en 1918 (ver Figura 1 - A) conocida también como *Trigona itama* (Discover Life, 2023). Por otro lado, Ali et al. (2021) y Halim et al.(2020, May) utilizaron colmenas de tipo MUSTAFA (Ver Figura 1 - B). Finalmente, sin identificar el tipo de colmena, la mayoría de las investigaciones utilizaron solo 1 colmena (Anuar et al., 2019, June; Anuar et al., 2021, March; Yunus et al., 2017) mientras que otros investigadores utilizaron 2, 3 y 4 (Ali et al., 2021; Halim et al., 2020, May; Miskon et al., 2022).

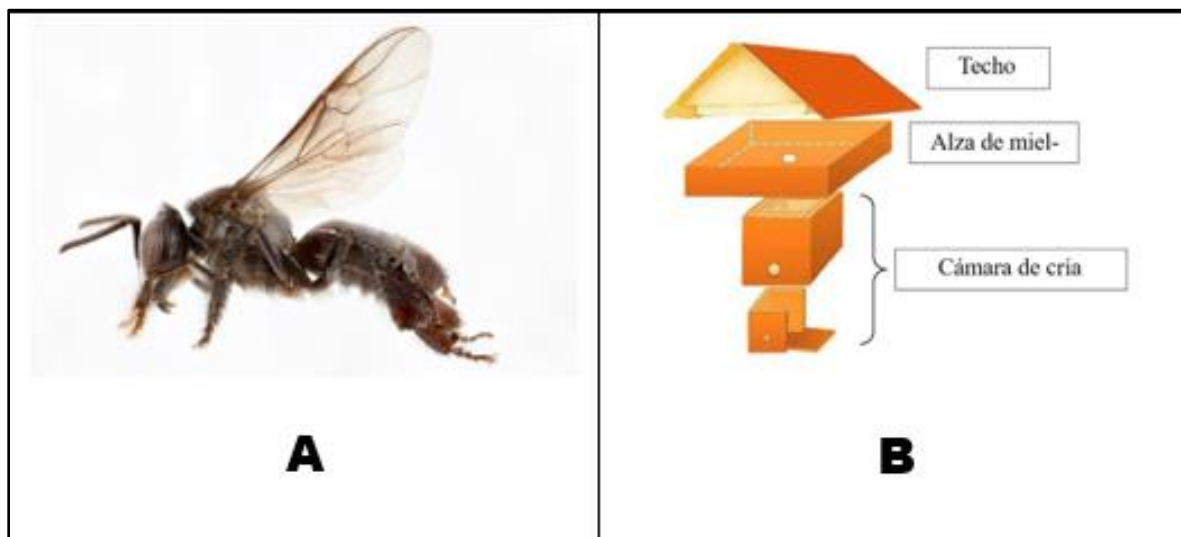


Figura No. 1. Tipo de abeja y colmena referido en la literatura consultada (adaptado de Yuwei (2019) (A) y Halim et al. (2020, May) (B))

Componentes de IoT Normalmente Utilizados

A pesar de la limitada cantidad de referencias de literatura relacionadas con el objeto de este TFG, siempre fue posible encontrar, de forma recurrente, diversos componentes de IoT específicos. Se lograron, incluso con su número de modelo, elementos de control de dispositivos, almacenamiento y/o transmisión de datos, suministro de potencia, registro (temperatura, humedad, peso y calidad del aire), captura de media (fotografía/video), emisión de infrarrojo, alarma y localización. Del mismo modo, se lograron identificar una serie de observaciones de implementación relevantes para esta investigación. El detalle de la finalidad, componentes y observaciones se incluyen en el apéndice 1 de este documento.

Resultados Obtenidos en la Aplicación de IoT en Meliponicultura

Esta última sección del marco teórico está orientada a reportar los resultados reportados en la literatura sobre la aplicación de IoT en meliponicultura. La sección cubre tres diferentes temas. Primero, se detallan los problemas encontrados con las implementaciones de IoT. Luego, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la tecnología en sí. Finalmente, se presentan los trabajos futuros sugeridos por los investigadores.

En cuanto a los problemas encontrados, Miskon et al. (2022) reportaron problemas específicos como el caso del sensor de peso que resultó ineficaz debido a los fuertes vientos en el área. Por otro lado, continúan explicando los investigadores, el sensor de humo de su aplicación debería ser de grado superior para producir lecturas consistentes. Finalmente, el sensor de temperatura y humedad debe ser a prueba de agua para evitar alterar la lectura del sensor. En otro estudio se reportó que la temperatura y la humedad dentro de las colmenas se vieron afectadas por el clima, la temperatura y la humedad del ambiente. (Ali et al., 2021). El último problema reportado fue el alto costo del sistema propuesto. (Anuar et al., 2019, June)

En cuanto a los resultados obtenidos, la mayoría de los elementos de literatura consultados se circunscriben a describir las implementaciones de IoT hechas. Por ejemplo, Miskon et al. (2022) reportaron que lograron construir y probar satisfactoriamente un banco de pruebas básico para el monitoreo de la colmena sin agujón. Otros investigadores reportaron que desarrollaron y presentaron un sistema electrónico integrado de monitoreo de colmenas sin agujón con aplicación IoT a través de aplicaciones de Android (EMAS). (Anuar et al., 2021, March). Adicionalmente, Anuar et al. (2019, June) presentaron una plataforma de baja energía para monitorear la actividad de alimentación de abejas sin agujón y el nivel de temperatura y humedad de la colmena. Otros investigadores desarrollaron un sistema que es económico y de fácil implementación. (Tashakkori et al., 2021). En otras investigaciones se mostró la aplicación o utilidad de la tecnología de IoT en contextos o necesidades específicas relacionadas con la meliponicultura. Por ejemplo, en una investigación se logró un control y regulación de la temperatura por medio de la solución de IoT propuesta. (Halim et al., 2020, May). Adicionalmente, Ali et al. (2021) crearon un modelo de hardware completo de una colmena artificial que contenía conexiones eléctricas para sensores de temperatura y humedad. Yunus et al. (2017) reportaron que su propuesta de sistema de IoT mostró que es posible registrar sistemáticamente información como la temperatura, la humedad y las

actividades de vuelo. Finalmente, en otro documento, se reportó que el sistema conocido como Mus-Tracker permite rastrear las colmenas robadas, sustraídas o reubicadas. (Anuar et al., 2019, June)

Para finalizar con esta última sección del marco teórico, se presentan a continuación las sugerencias de trabajos futuros hechas por los autores de los elementos de literatura consultados. Algunas sugerencias tienen que ver con incorporar otros elementos de IoT puntuales tales como un acelerómetro para medir la vibración causada por el viento y otras causas externas (Miskon et al., 2022), paneles fotovoltaicos para proporcionar energía (Halim et al., 2020, May), sensores contadores de abejas sin aguijón (Anuar et al., 2019, June) y sensores de pesaje para estimar la cantidad de miel producida en colmenas sin aguijón sin abrir la colmena. (Ali et al., 2021). Por otro lado, otro estudio se orientó en sugerir desarrollar más investigación relacionada con analizar diversos problemas específicos de la meliponicultura con el fin de buscar soluciones por medio de IoT. (Tashakkori et al., 2021). Finalmente, otro estudio recomienda ampliar el alcance de los sistemas propuestos al instalar el sistema en un mayor número de colmenas para permitir una observación a largo plazo de los datos y lograr con esto mejorar el rendimiento del sistema. (Anuar et al., 2021, March)

III. MATERIALES Y METODOS

En la investigación reportada en este TFG se utilizaron tres técnicas de investigación a saber: Revisión de Literatura, Encuesta y Prototipado. En la teoría se documentan extensamente las principales consideraciones prácticas de cada una de estas técnicas de investigación. En el Apéndice 2, se resumen algunas de estas consideraciones más representativas. En el caso de este TFG, cada una de estas técnicas se utilizó de forma muy puntual para atender los requerimientos implícitos en cada uno de los objetivos específicos de la investigación tal como lo mostramos a continuación.

Revisión de Literatura

La revisión de literatura se utilizó para sistematizar el primer objetivo específico y así identificar posibles aspectos técnicos de IoT a ser adaptados en el contexto de estudio. Para el proceso de identificación de fuentes de literatura se utilizó como base de datos bibliográfica Google Académico la cual, junto con otras como Scopus y Web of Science, cubren de forma muy adecuada contenidos de temas agrícolas. (Ritchie et al., 2018) La búsqueda inicial se organizó utilizando el software “Publish or perish”¹. Considerando que el concepto de IoT fue acuñado originalmente en 1999 (Madakam et al. 2015), el rango de fechas utilizado para la búsqueda de documentos fue del 2000 al 2022. Se utilizaron ciertas palabras clave para la búsqueda las cuales arrojaron una cierta cantidad de elementos de literatura a saber: “IoT” + “meliponiculture” (33 resultados), “Internet of things” + “meliponiculture”, (14 resultados), “Internet de las cosas” + “meliponicultura” (3 resultados) y, finalmente, “IoT” + “meliponicultura” (0 resultados) para un total de 50 documentos resultantes de esta búsqueda inicial. Luego de esto se procedió a descartar los elementos de literatura que estuvieran repetidos (puesto que se hicieron búsquedas con diferentes palabras clave), que no estuvieran en idioma español o inglés y que no estuvieran relacionados con describir estudios o experiencias relacionadas con IoT en colmenas de meliponas. Hecho este análisis, la cantidad de elementos resultantes consistió en 8 referencias de literatura completamente relacionadas con IoT en meliponas mismas que se presentan en el Apéndice 3.

Encuesta

La segunda técnica utilizada estaba relacionada con el segundo objetivo específico que indicaba recolectar información sobre la percepción de los meliponicultores e investigadores sobre el tema

¹ Tarma Software Research Ltd, versión 8.8.4384.8527

en Costa Rica. El contexto de desarrollo de esta encuesta fue nacional e internacional para permitir la participación de investigadores de la meliponicultura. Participaron 25 personas y se utilizó el software Google Forms² para sistematizar el proceso de recolección de los datos. El formulario de la encuesta incluyó una primera sección de datos demográficos que contenía preguntas cerradas. En la segunda sección se incluyeron una serie de preguntas cerradas utilizando una escala de Likert de 5 niveles. En esta sección las preguntas estaban relacionadas con el nivel de importancia de controlar determinadas variables respecto a la colmena tales como temperatura, humedad, localización, etc. En la tercera sección del formulario se hicieron preguntas abiertas para permitir a los participantes ampliar su opinión expresada en la sección dos. En el Apéndice 4 se incluye el formulario de la encuesta.

Prototipado

La tercera técnica de investigación estaba relacionada con el tercer objetivo específico de este TFG que indicaba desarrollar un prototipo de solución de IoT. Esta técnica se usó como una forma de poner en práctica los principales elementos de IoT determinados como interesantes para el contexto de estudio. La idea original era instalar el prototipo en el meliponario del CINAT localizado en el Campus Benjamín Núñez de la UNA en Lagunilla de Heredia (1036msnm) pero por problemas de conexión a la red inalámbrica WiFi del campus universitario, se optó por colocar el prototipo en otro lugar con las condiciones óptimas para la prueba del prototipo.

Específicamente se trató del lugar conocido como Bajo San Juan, Distrito de Llano Bonito, Cantón de San Pablo de León

Cortés (1381msnm) (Ver Figura No.2).

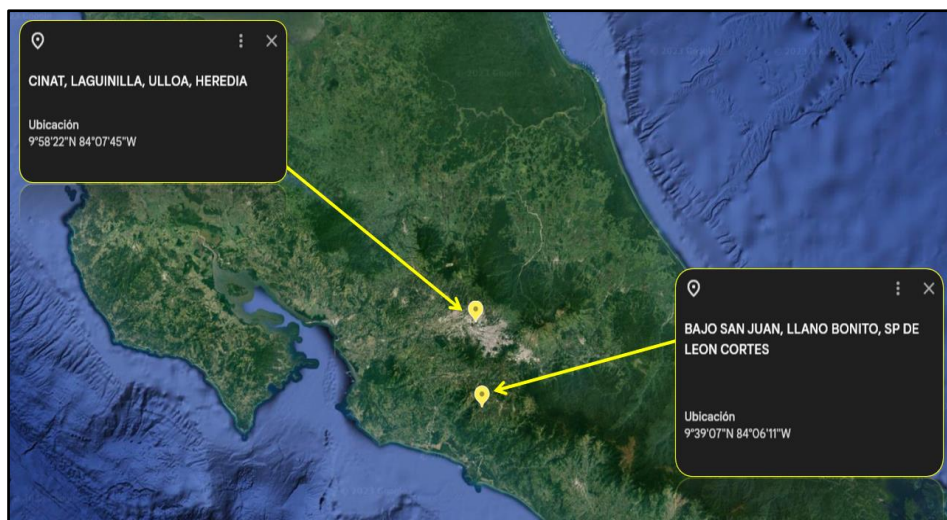


Figura No. 2. Ubicación planeada Vs. ubicación definitiva del prototipo.

² www.google.com/forms

La arquitectura del prototipo se muestra en la Figura No.3. La idea general es la conexión de diferentes elementos de tecnología de IoT a una base de datos localizada en la nube de forma tal que datos del interior y entorno de la colmena pudieran ser recolectados, transmitidos a intervalos específicos de tiempo y almacenados en una base de datos en la nube para el posterior acceso y consumo de la información. La conexión se logró por medio de una red inalámbrica WiFi. Los elementos de IoT instalados en el prototipo estaban ubicados en el frente de la colmena.

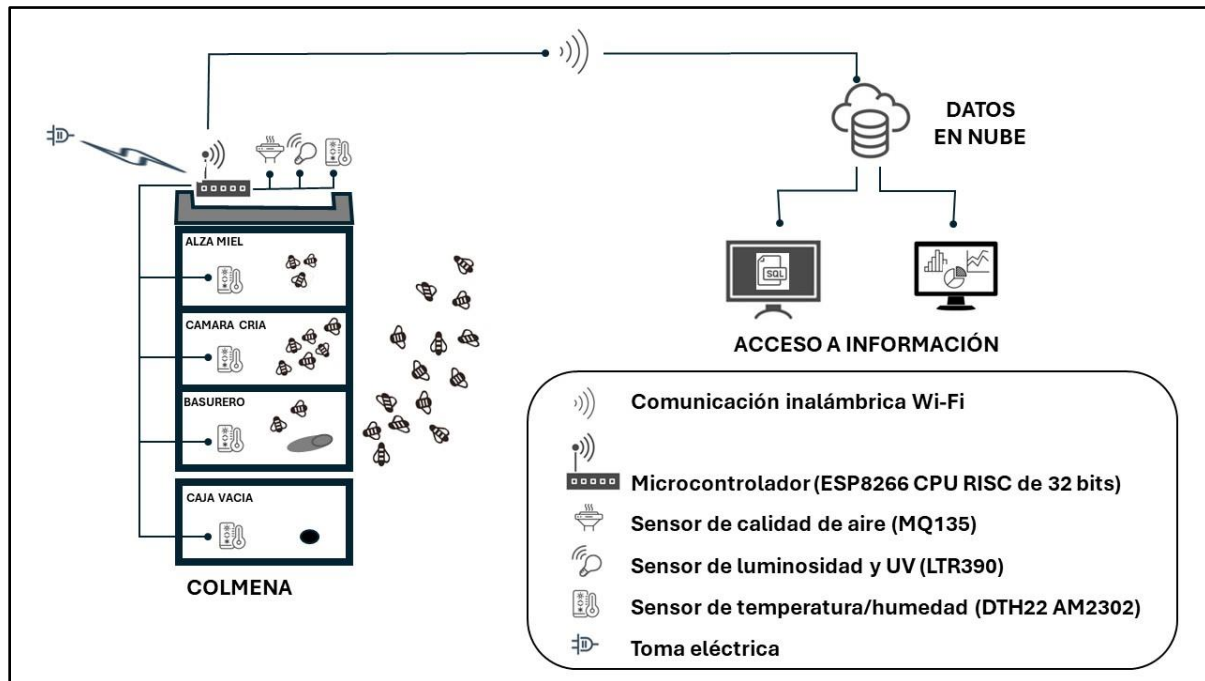


Figura No. 3. Arquitectura del prototipo

En este lugar, se ubicaron dispositivos tales como la tarjeta microcontroladora (ESP8266 CPU RISC de 32 bits), además de sensores externos de calidad de aire (MQ135), luminosidad/UV (LTR390), y temperatura/humedad (DTH22 AM2302) (Ver Figura No.4). El soporte de energía eléctrica para la operación del prototipo se logró por medio de una toma eléctrica. Adicionalmente, dentro de la colmena se colocaron varios sensores de temperatura y humedad. El contenedor de la

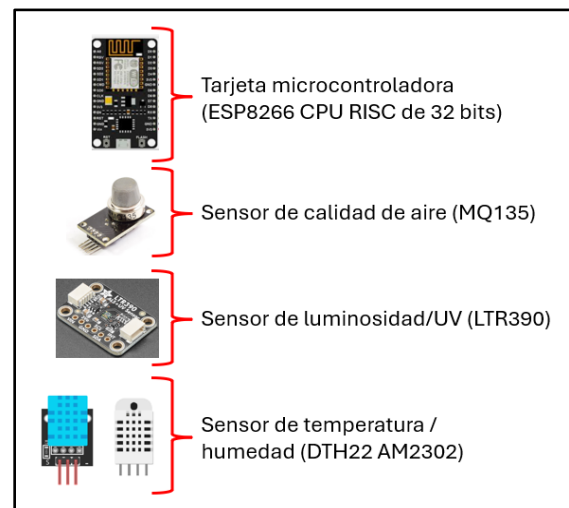


Figura No. 4. Detalle de sensores utilizados

colmena consistió en una caja tecnificada que tiene un techo, un alza de miel, una cámara de cría y un basurero en donde esta localizada la piquera. Se adicionó una caja vacía para efectos de control.

La colmena utilizada está alojada en una caja tecnificada que alberga una colonia de abejas Mariola (*Tetragonisca angustula* - Latreille, 1811) (Camargo et al., 2023). La colonia está ubicada en esa caja y ubicación geográfica, desde hace aproximadamente 1 año y medio. Después de colocado el prototipo, a la colmena se le colocó de forma profusa cinta adhesiva de color gris para proteger a las abejas del ataque de hormigas y para fijar diversos elementos del prototipo como cables de datos y de energía eléctrica. (Ver Figura No. 5)



Figura No. 5. Prototipo instalado

Análisis de datos

Para el análisis de los datos se utilizaron diversos elementos de estadística descriptiva e inferencial. Específicamente se calcularon medidas descriptivas como sumatorias, promedios, desviaciones estándar y coeficientes de asimetría. También se utilizaron diversos gráficos que describieron elementos tales como estado de los datos y distribuciones. También se utilizaron técnicas estadísticas tales como alfa de Cronbach para medir la confiabilidad del cuestionario de percepción utilizado, así como pruebas estadísticas Kruskal Wallis y t-estudent. Las técnicas estadísticas utilizadas en la prueba del prototipo corresponden a pruebas que se realizaron con el fin único de lograr los objetivos relacionados con la construcción y prueba del prototipo y no con propósitos de analizar la situación de la colmena, hábitos de las abejas y/o cualquier otro tema no incluido en el alcance de este TFG.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la investigación. El capítulo se estructura en base a los objetivos propuestos, las técnicas aplicadas y el contraste con la literatura consultada. Primero se revisarán y discutirán los resultados obtenidos en la revisión de literatura. Seguidamente, se hará lo mismo con los resultados de la encuesta y se finaliza el capítulo presentando los resultados obtenidos de la prueba del prototipo desarrollado.

Literatura consultada

La literatura consultada permitió conocer los referentes teóricos de la aplicación de IoT en meliponicultura. El sustento teórico resultante de la aplicación de esta técnica permitió orientar el desarrollo del TFG.

Entre otros componentes de la tecnología IoT encontrados en la literatura, el controlador ESP8266 mencionado por Anuar et al. (2019, June), fue utilizado en el desarrollo del prototipo.

La revisión también permitió identificar otros dispositivos para recolectar datos de temperatura y humedad al mismo tiempo. (Ali et al., 2021; Anuar et al., 2019, June; Miskon et al., 2022; Tashakkori et al., 2021; Yunus et al., 2017). Este tipo de variables se recolecta por lo general utilizando el mismo sensor. En el caso de este TFG, se utilizó el sensor de medición de temperatura/humedad DHT22 reportado por Anuar et al. (2019, June) y Miskon et al. (2022)

En la revisión de literatura también se encontraron detalles sobre el sensor de humo MQ135 (Miskon et al., 2022) mismo que también fue utilizado en el desarrollo del prototipo

En el caso del sensor de luminosidad y UV (LTR390) que fue utilizado en este TFG, el mismo no aparece reportado en la literatura utilizada en este TFG. Otros elementos encontrados en la literatura no fueron utilizados por razones de conveniencia o poca relevancia en la percepción de su importancia.

Encuesta de percepción

Los datos recopilados en la encuesta permitieron indagar cual es la percepción sobre los principales problemas presentes en la meliponicultura en Costa Rica, esto, principalmente entre meliponicultores. Si bien es cierto el contexto de la investigación era principalmente Costa Rica, por la importancia de conocer sus opiniones, se habilitó la posibilidad de participación de personas del extranjero que eran, por lo general, investigadores.

En la encuesta participaron 25 personas entre meliponicultores e investigadores. El 12% (3) tenían una edad de entre 25 y 35 años. El 44% (11) fueron participantes que tenían edades comprendidas entre 35 y 50 años o más de 50 años para ambos casos. De los participantes, el 20% (5) eran de género femenino. Los participantes que reportaron ser investigadores fueron el 24% (6) mientras que el resto de los participantes, es decir 19 constituyeron el 76%. El lugar donde los participantes de la encuesta desarrollan su actividad era San José (9 participantes para un 36%), Puntarenas y el extranjero (4 participantes para un 16% cada uno), Guanacaste (3 participantes para un 12%), Limón y Alajuela (2 participantes para un 8% cada uno) y Heredia (1 participante para un 4%).

El cuestionario enviado contenía una subescala de percepción de sobre la importancia de conocer el estado de 15 aspectos relacionados con la meliponicultura ($\alpha = 0,88$). A su vez, cada uno de estos aspectos se evaluó por medio de una escala de medición que iba de 1 a 5 (siendo 5 la mayor importancia). Los resultados obtenidos en esta parte del cuestionario se muestran en la Figura No. 6. El mayor nivel de importancia percibida fue para:

- Temperatura y humedad tanto interna como externa a la colmena. Este tipo de sensores fueron reportados como utilizados en diversas investigaciones (Ali et al., 2021; Anuar et al., 2019, June; Miskon et al., 2022; Tashakkori et al., 2021; Yunus et al., 2017).
- Calidad del aire. Reportado por Miskon et al.(2022)
- Cantidad de abejas. Aspecto reportado en la literatura al hablar de dispositivos para medir luz infrarroja (Anuar et al., 2021, March; Yunus et al., 2017)
- Sonido tanto interno como externo. En este sentido, Tashakkori et al. (2021) reportaron la utilización de, entre otros dispositivos, un micrófono para registrar audio
- Luminosidad. No encontramos en la literatura utilizada ninguna referencia que reportara la utilización de este dispositivo en colmenas de meliponas.

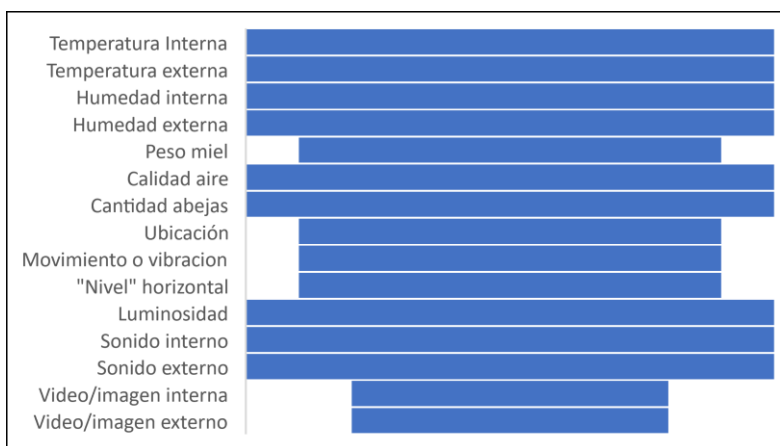


Figura No. 6. Percepción sobre el nivel de importancia de diferentes aspectos para la meliponicultura

Considerando estos resultados, en el prototipo desarrollado se incorporaron estos elementos excepto los dispositivos requeridos para determinar la cantidad de abejas y el registro del sonido interno y externo. La razón primordial de esta exclusión es meramente un asunto de recursos; no se contó con el tiempo necesario para desarrollar la programación del software requerido además de que estos dispositivos tenían un costo mayor.

Prueba del prototipo

El desarrollo del prototipo se realizó en el tiempo especificado en la planificación existente. Tal como se mencionó previamente, la ubicación del prototipo tuvo que variarse para cumplir los objetivos del TFG. El objetivo relacionado con el prototipo especificaba desarrollar el mismo utilizando tecnología de IoT para recolectar datos de prueba que permitan evaluar la funcionalidad del prototipo y determinar trabajos futuros a desarrollar. En esta sección presentamos los resultados obtenidos con el prototipo. Dichos resultados los organizamos en sub-secciones relacionadas con las generalidades del prototipo, la protección de los sensores del prototipo, el funcionamiento operativo del prototipo y el costo del prototipo. Iniciamos con las generalidades del prototipo.

Generalidades del prototipo

Previamente, en el capítulo “III, Materiales y Métodos”, sección “Prototipado”, se describió la arquitectura del prototipo desarrollado. Los componentes y su ubicación en la colmena se muestran en la Figura No. 7. En la vista ampliada (izquierda de la figura) se aprecia la ubicación del registro de temperatura y humedad para el alza de miel (“ta” y “ha” respectivamente), cámara de cría (“tc” y “hc” respectivamente), basurero (“tb” y “hb” respectivamente) y para la caja vacía (“tv” y “hv” respectivamente). En esta vista ampliada también se puede visualizar la ubicación de la entrada de la colmena (piquera). En la vista detallada localizada a la derecha de la figura, se pueden observar los sensores externos para registrar la calidad del aire (ca), la luminosidad y UV (“le” y “uv” respectivamente) y la temperatura y humedad (“hr” y “hr” respectivamente). Aquí también se presenta la ubicación de la tarjeta controladora del prototipo que incluye, entre otras funcionalidades técnicas, la conexión WiFi. Finalmente, en la vista detallada se aprecia la conexión eléctrica que da energía al prototipo.

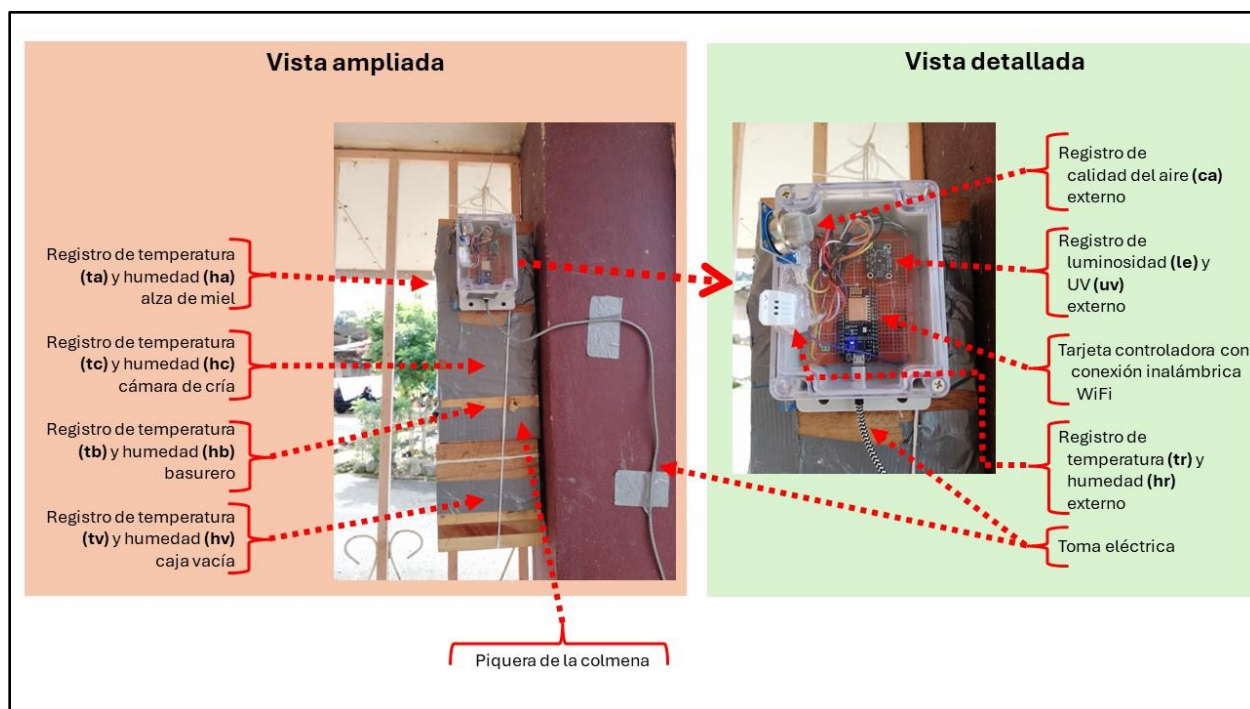


Figura No. 7. Prototipo instalado e identificación de componentes.

El software de operación del prototipo fue desarrollado utilizando Arduino IDE(2.2.1)³. La recolección de los datos se programó para hacerse de forma automática cada 30 minutos transfiriéndose de inmediato dichos datos a una base de datos en la nube. Esta base de datos estaba albergada en un servidor gratuito de prueba proveído por Hostinger⁴. Esta información registrada en esta base de datos estaba habilitada para su consumo posterior descargando la información y transfiriéndola a otros productos de software tales como Excel⁵ o PowerBi⁶

Para efectos de este TFG, el prototipo se mantuvo activo por 15 días para un total de 360 horas de operación ininterrumpida. Se recolectaron un total de 720 registros de lectura.

Considerando las funcionalidades incluidas en este prototipo, las mismas corresponden a prototipos similares a los desarrollados en experiencias previas documentadas en la literatura en aspectos tales como medición de temperatura (Ali et al., 2021; Anuar et al., 2019, June; Miskon et al., 2022; Tashakkori et al., 2021 y Yunus et al., 2017), medición de humedad (Anuar et al., 2019,

³ <https://www.arduino.cc/en/software>

⁴ <https://www.000webhost.com/>

⁵ <https://www.microsoft.com/excel>

⁶ <https://powerbi.microsoft.com/es-es/>

June; Miskon et al., 2022 y Tashakkori et al., 2021) y medición de la calidad del aire (Miskon et al., 2022). En este sentido, en este prototipo se logró reproducir la experiencia, pero con otro tipo de abejas, en este caso, *T. angustula*.

Protección de los sensores del prototipo

Uno de los aspectos que fue considerado durante el diseño y construcción del prototipo fue el del eventual efecto que la propolización pudiera tener en los componentes internos del prototipo. Considerando que el propóleo suele ser utilizado por las abejas para, entre otras cosas, momificar a los intrusos de la colmena (Przybyłek & Karpiński, 2019), durante el diseño surgió la duda de que pasaría con aquellos componentes del prototipo que se fueran a estar dentro de la colmena. En una prueba de campo realizada por un periodo de 26 días durante el mes de octubre (época lluviosa en Costa Rica), se colocaron algunos componentes electrónicos de desecho dentro de una colmena de *T. angustula*. Dichos componentes son los que se observan en la Figura No. 8 (parte superior de la figura). Se ubicaron componentes en el basurero, cámara de cría y alza de miel respectivamente. En la fotografía inferior de la misma figura se aprecia el resultado al final de la prueba. Si bien es cierto se nota cierto efecto de potencial propolización de las abejas sobre esos componentes, no pareciera que, en ese periodo de tiempo, la propolización fuera a afectar de forma severa a los componentes.

No obstante lo anterior se decidió considerar, en el diseño de los sensores que irían colocados dentro de la colmena, lo recomendado por Ali et al.(2021) y Yunus et al. (2017) respecto a utilizar cinta politetrafluoroetileno (PTFE), más conocido como teflón. Estos investigadores indicaron que al envolver los sensores con PTFE se evitaba que el propóleo interfiriera con la lectura hecha por estos además de permitir que el vapor de agua pasara de un lado a otro mientras se protege al sensor de la cera de abeja o el propóleo. Antes de hacer uso de PTFE, se decidió verificar si las lecturas de los sensores no se verían afectadas con su utilización. Esta prueba en particular se realizó, estando el prototipo aún sin instalar en la colmena.

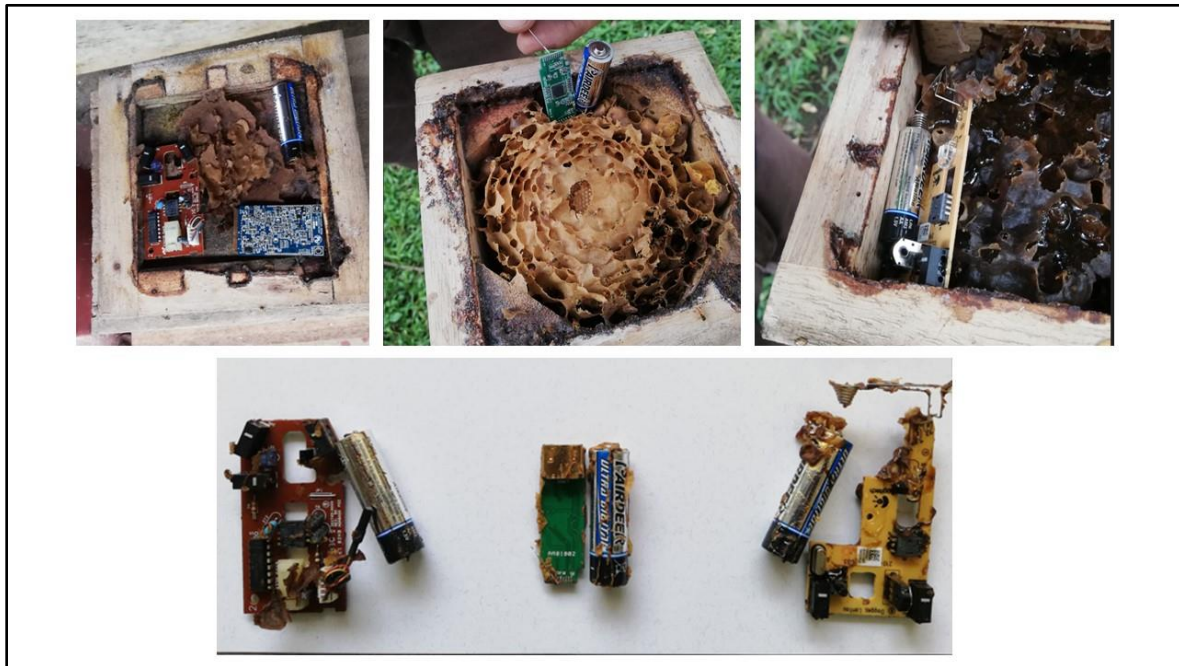


Figura No. 8. Prueba de propolización.

Primero verificamos que los sensores generan lecturas similares antes de adicionar el PTFE. En este sentido, se recolectaron 44 mediciones simultaneas de temperatura y humedad en los 5 sensores (tr/hr, ta/ha, tc/hc, tb/hb y tv/hv). Utilizando una prueba Kruskal-Wallis (debido a que las distribuciones de estas series de datos no eran normales), se determinó que los resultados registrados para temperatura y humedad no mostraron una diferencia significativa (p-valor de 0.5804 y .89164 respectivamente).

Luego de esto, se colocó PTFE de 1,8 cm de ancho a algunos sensores. Específicamente se colocaron 10 cm al sensor tv/hv, 20 cm al sensor tb/hb, 30 cm al sensor tc/hc y 40 cm al sensor ta/ha. El sensor tr/hr se dejó sin PTFE. Luego de esto, utilizando nuevamente una prueba Kruskal-Wallis, se determinó que los resultados registrados para temperatura y humedad para 47 mediciones mostraron una diferencia significativa en al menos uno de los sensores (p-valor de 0.00538 y 0.00045 respectivamente). Para determinar las diferencias significativas exactas, realizamos una batería de pruebas t-student entre todos los sensores obtenido los resultados mostrados en la Tabla No. 1. Aquí se puede apreciar que el sensor tr/hr (mismo que se dejó sin PTFE), mostró diferencias significativas con todos los demás sensores. Como resultado de esto,

la recomendación de Ali et al.(2021) y Yunus et al. (2017) no fue utilizada en nuestro caso porque el uso del PTFE habría alterado las mediciones de los sensores.

	Sensor	tr/hr	ta/ha	tc/hc	tb/hb	tv/hv
Temperatura	tr/hr					
	ta/ha	0,002				
	tc/hc	0,003	0,46			
	tb/hb	0,0005	0,27	0,24		
	tv/hv	0,001	0,39	0,35	0,38	
Humedad	tr/hr					
	ta/ha	0,00003				
	tc/hc	0,001	0,14			
	tb/hb	0,008	0,07	0,31		
	tv/hv	0,0004	0,43	0,23	0,13	

Tabla No. 1. Pruebas t-student realizadas con el PTFE colocado

Considerando la prueba visual de propolización y la comprobación de que el PTFE podría alterar la medición de los sensores ubicados en el interior de la colmena, se determinó colocar dichos sensores sin ninguna protección aparte de la proporcionada “de fabrica”.

No obstante lo anterior, una vez extraídos y revisados los sensores que estaban colocados a lo interno de la colmena, se hizo evidente el avance de la propolización durante el periodo de prueba. En la Figura No. 9 se aprecia el estado final de los sensores de temperatura/humedad colocados a lo interno de la colmena. No estaba dentro del alcance de este TFG explorar el efecto de la propolización en los sensores. No obstante, es muy difícil no suponer un deterioro en la funcionalidad de dichos sensores en el corto plazo si la natural propolización continuara mas tiempo.

Funcionamiento operativo del prototipo

Se procedió a verificar la operatividad del prototipo por medio de diversos mecanismos. Entre ellos están el cálculo de métricas operativas, funcionales y el registro y análisis preliminar de los datos registrados por todos los sensores. Iniciamos este recuento de verificación del funcionamiento operativo con las métricas operativas del prototipo.

Las métricas operativas están relacionadas con la operatividad en sí de algunos sensores del prototipo. Específicamente se utilizaron las dos fórmulas mostradas en la Figura No. 10. Una de estas fórmulas es para el cálculo de la operatividad del sensor (1) y otra para el cálculo de la

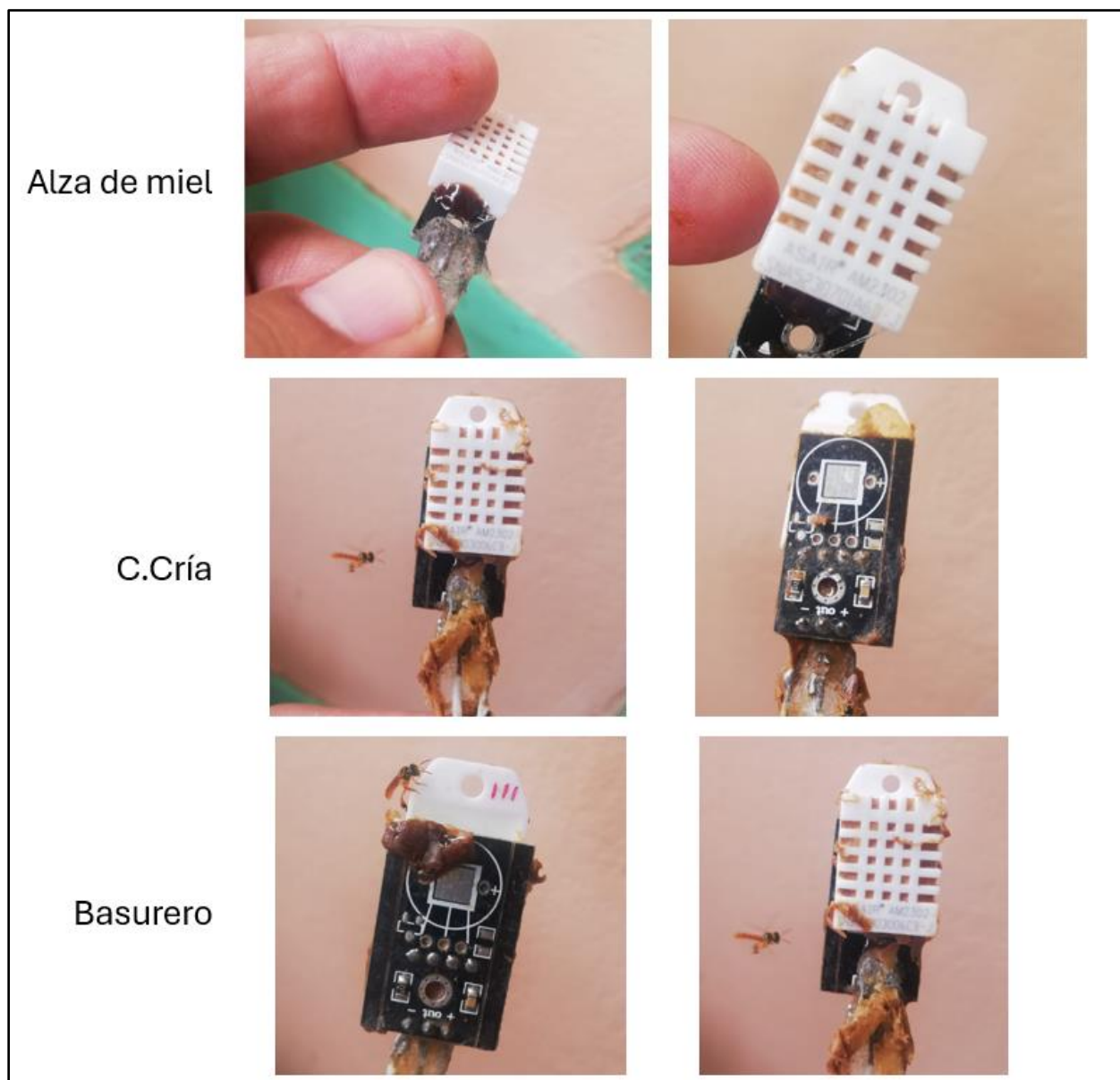


Figura No. 9. Sensores de temperatura/humedad extraídos de la colmena luego de 3 semanas de prueba.

frecuencia de tiempo efectivo (2). La operatividad del sensor (“o”) está dada por la relación entre la cantidad de mediciones hechas (“mc”) y la cantidad de errores de lectura (“el”). Esta métrica se puede calcular con todos los sensores. Por su parte la frecuencia de tiempo efectivo (“ft”) está dada por la relación entre “t” que corresponde a la cantidad de mediciones hechas y “te” que corresponde a la cantidad de mediciones hechas con tiempo no efectivo. Este último concepto

está relacionado a la funcionalidad programada en el prototipo sobre el tiempo de transmisión de los datos. Dicha transmisión era, de forma ideal, para cada 30 minutos. Sin embargo, si la transmisión no se realizaba en dicho intervalo de tiempo, por algún error de conexión, corte eléctrico, etc., el programa posponía dicha transmisión para unos segundos después hasta lograr la transmisión efectiva. La idea es garantizar la transmisión de la lectura hecha.

$$o = 1 - \left(\sum_{i=1}^n mc / - \sum_{i=1}^n el \right) \quad (1)$$

$$ft = 1 - \left(\sum_{i=1}^n t / - \sum_{i=1}^n te \right) \quad (2)$$

Figura No. 10. Fórmulas para cálculo de operatividad de sensores.

Los resultados obtenidos con la operación de los sensores del prototipo (“o”) fueron del 100% en todos los sensores excepto el localizado en el alza de miel (ta/ha) que arrojó una operatividad del 29,29% para el caso de la temperatura (ta) y un 29,94% para el caso de la humedad (ha). La irregularidad del tiempo y frecuencia del error presentado por este sensor, unido al hecho de que esta ubicado en el alza de miel, podría llevar a hipotetizar que se puede tratar de un problema de “corto circuito” provocado por la presencia de la miel. Si bien es cierto que se colocaron los sensores, incluido este, con el cuidado necesario para no lastimar el nido, a las abejas y a las reservas de miel, podría haberse dado el caso de que el sensor se impregnara de miel o que las abejas, impregnadas de miel caminaran sobre el sensor en el momento de la medición. La conductividad de la miel ha sido determinada por Živkov-Baloš et al., (2018) en rangos de entre 0,08 y 1,99 ms/cm siendo la más alta conductividad la encontrada en muestras de miel de bosque (caso similar al entorno de la colmena usada en este TFG) y tilo. No obstante, Nordin et al., (2018) reportaron la conductividad eléctrica de la miel de diversas abejas sin aguijón, pero no lo pudieron determinar para el caso de *T. angustula*. En todo caso esta hipótesis es, solo eso, una hipótesis, una posibilidad más; también podría simplemente ser necesario decantarse, en este caso, por la

Navaja de Ockham y presumir que simplemente el sensor estaba defectuoso o se dañó durante su instalación. Por su parte, la frecuencia de tiempo efectivo (“ft”) fue del 79,53%. En la literatura consultada no se registra este tipo de métricas por lo que no es posible realizar un contraste de este resultado con algún estudio documentado.

El funcionamiento operativo también se verificó utilizando una fórmula para determinar la funcionalidad del prototipo. Esta funcionalidad esta relacionada con utilizar los resultados de las mediciones del prototipo para el cálculo de una métrica que pueda ayudar a futuros procesos de gestión o investigación de este tipo de abejas. En este caso, se procedió a calcular el punto de rocío (Lawrence, 2005). Esta métrica se calcula con las dos fórmulas mostradas en la Figura No. 11. El punto de rocío para un determinado sensor (“prx”) se representa en la formula “1.a”. En este caso, el punto de rocío esta dado por la relación entre la temperatura de un sensor (“tx”) y la humedad del mismo sensor (“hx”). El porcentaje del punto de rocío para un determinado sensor (“pprx”) se representa en la formula “1.b”. Esta métrica se podría calcular para los sensores externos de temperatura y humedad (tr/hr) y para todos los sensores internos, es decir, para el alza de miel (ta/ha), cámara de cría (tc/hc), basurero (tb/hb) y, en el caso de la implementación realizada para este TFG, también para el caso de la caja vacía (tv/hv). No obstante, tal como se explicó anteriormente, el sensor del alza de miel (ta/ha) no trabajó adecuadamente por lo que se optó por no hacer el cálculo para dicho sensor.

$$prx = tx - \left(\frac{100 - hx}{5} \right) \quad (1.a)$$

$$pprx = 100 - 5(tx - prx) \quad (1.b)$$

Figura No. 11. Fórmulas para cálculo de punto de rocío

El punto de rocío (también conocido como temperatura de punto de rocío) es la temperatura a la que el aire alcanza la máxima lectura de saturación. Esta métrica se determina por la relación entre la humedad y temperatura. Si la temperatura es inferior al punto de rocío se produce el proceso

de condensación. El rango de aparición de condensación es el punto de rocío + 1,5 grados centígrados variando esto de acuerdo con el tipo de materiales o superficies asociadas a la medición (por ejemplo, al tipo de material con el que está construida una caja para albergar una colmena) (Anuar et al., 2021, March).

Los resultados obtenidos en el cálculo del punto de rocío (“pr”) fueron obtenidos para cada una de las lecturas hechas. En promedio, los resultados se muestran en la Figura No. 12.

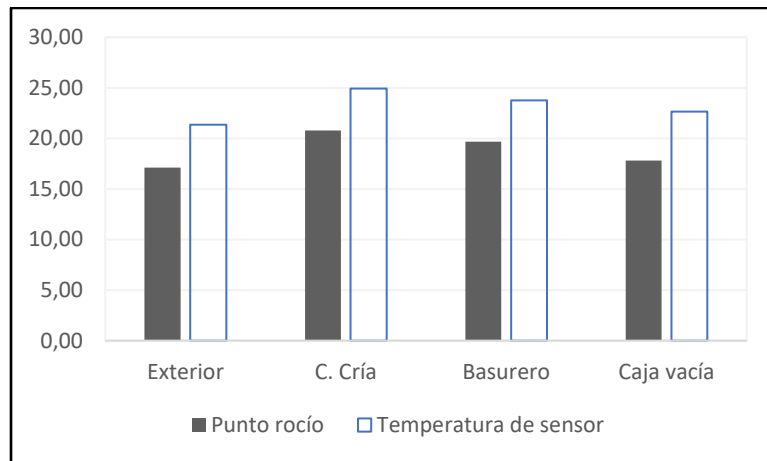


Figura No. 12. Promedios de punto de rocío y temperatura por cada sensor

Una visualización detallada del punto de rocío y su respectivo contraste con la temperatura del sensor respectivo se muestra en la Figura No. 13. Como se puede apreciar en cámara de cría se presenta el fenómeno de que el punto de rocío y la temperatura muestran un comportamiento proporcional. En menor medida se aprecia la misma situación en el basurero. No se da esta situación en el exterior ni para la caja vacía. La condensación a lo interno de una colmena podría propiciar un aumento de la humedad. Según Guimarães-Cestaro et al. (2020), un aumento o disminución en la aparición de abejas sin aguijón con *Nosema ceranae*, está provocado de forma positiva por condiciones como, entre otras, las variaciones de temperatura y humedad relativa mismas que podrían estar relacionadas con la ausencia de alimento suficiente para la colonia. Consecuentemente, el uso de esta métrica resulta en una funcionalidad importante del prototipo desarrollado por las posibilidades futuras que este tipo de información podrían tener para la gestión y/o investigación de este tipo de insectos.

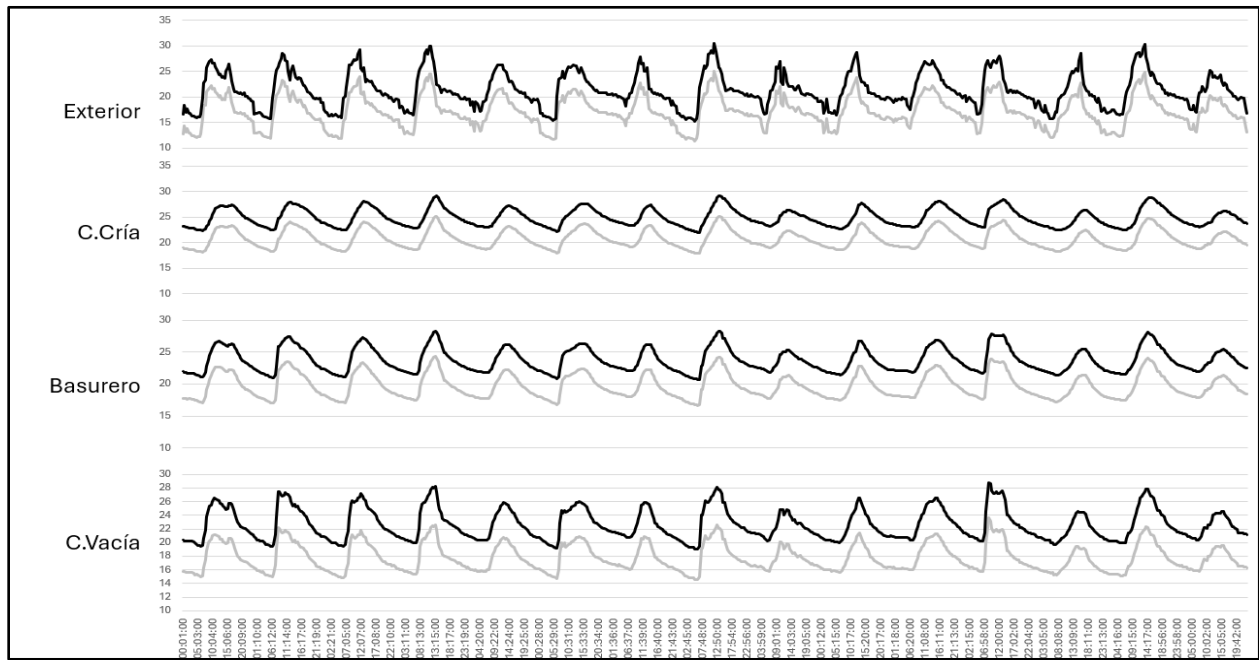


Figura No. 13. Punto de rocío y temperaturas para diversos sensores (temperatura en color negro)

Para finalizar este análisis de la operatividad de los sensores de temperatura y humedad, se realizó una prueba Kruskal-Wallis sobre todos los datos registrados, se determinó que los resultados registrados para temperatura y humedad mostraron una diferencia significativa ($p\text{-valor} < 0,001$ para ambos casos) reflejando que, en el interior de la colmena, la temperatura y la humedad son diferentes dependiendo de la sección de la caja tecnificada donde se haga la medición. Por su parte, en la Figura No. 14 se muestran los diagramas de bigotes para la información registrada por los sensores de temperatura y humedad. La poca variación en la humedad para la cámara de cría y basurero es notoria.

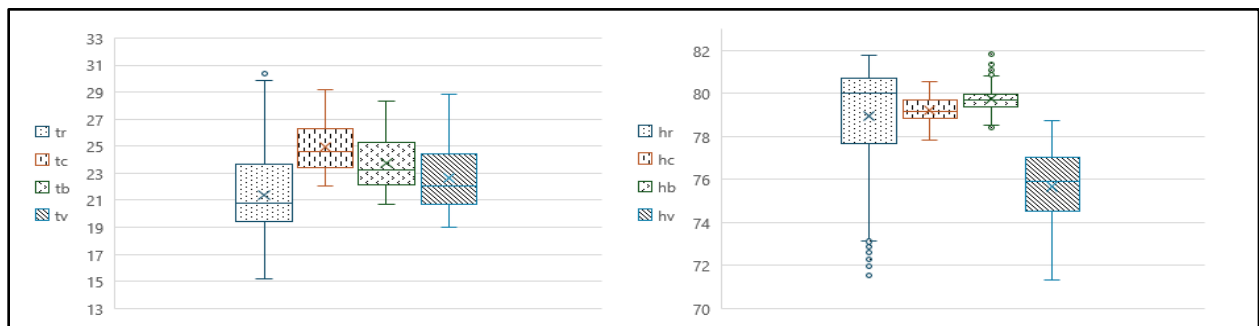


Figura No. 14. Diagrama de bigotes para los sensores de temperatura y humedad

La operatividad también se demostró al revisar las mediciones del sensor de luminosidad/UV. En la Figura No. 15 se aprecia el contraste entre estas variables. Si bien es cierto los patrones de datos son similares no se trata de medidas exactas en su forma lo cual abre la posibilidad de utilizar estas dos mediciones con fines específicos a nivel de gestión o investigación.

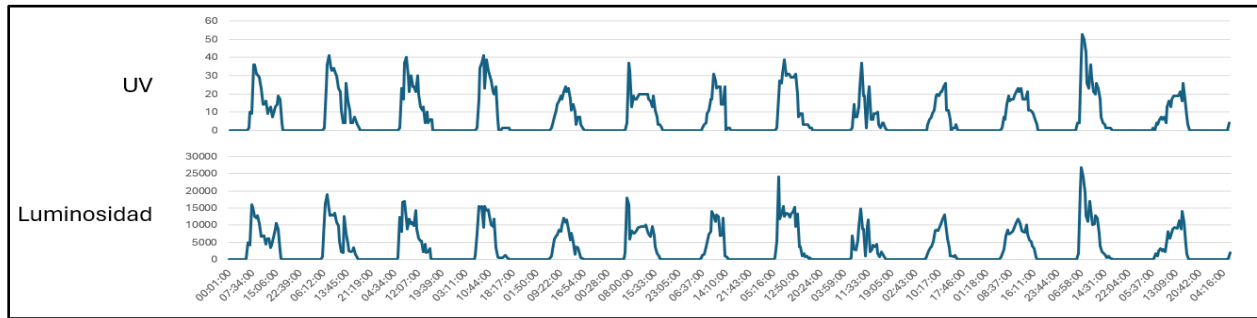


Figura No. 15. Lecturas de UV y luminosidad

En este mismo sensor se procedió a determinar la exactitud de la medición. El Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica proporciona en su sitio web una herramienta del cálculo de la salida y puesta del sol y la luna⁷. Con esta calculadora fue posible determinar, para

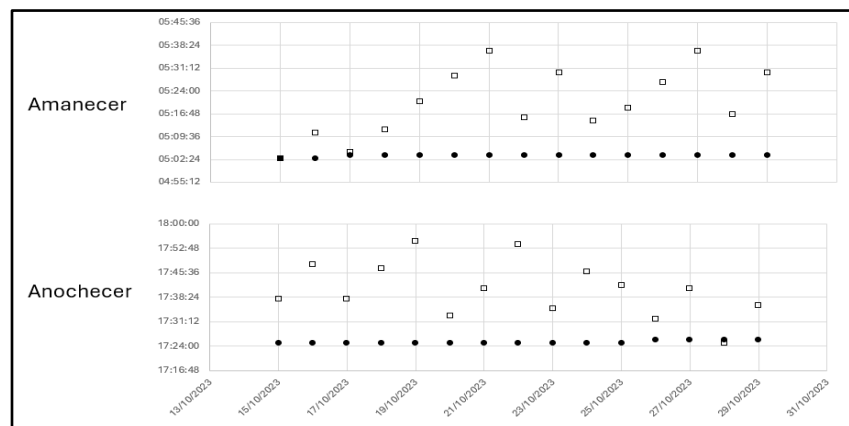


Figura No. 16. Contraste de tiempo aproximado para amanecer/anochecer (● para calculadora, □ para tiempo registrado por el sensor)

las mismas fechas de medición utilizadas durante la prueba del prototipo, la hora exacta de la salida y puesta del sol en las coordenadas precisas de la ubicación del prototipo.⁸ El prototipo no registró la lectura cada minuto, fue cada 30 minutos. No obstante, se procedió a comparar los resultados de la calculadora contra los resultados más próximos determinados para el amanecer y anochecer. Estos resultados se muestran en la Figura No. 16. Por la periodicidad de la lectura (cada 30 minutos) esta visualización no es muy útil. No obstante, se presenta esta información aquí como

⁷ <https://www.imn.ac.cr/web/imn/enlaces-externos1>

⁸ 9:39:07N / 84°06'11"

una propuesta de verificación opcional de la operatividad de este sensor en un caso en donde la medición fuera hecha cada minuto.

Para el caso del sensor de calidad del aire se determinó su operatividad con el registro de esta variable también cada media hora. Después de un periodo de auto calibración del sensor de varias horas, los resultados arrojaron una situación de calidad del aire estable (Ver Figura No.17)

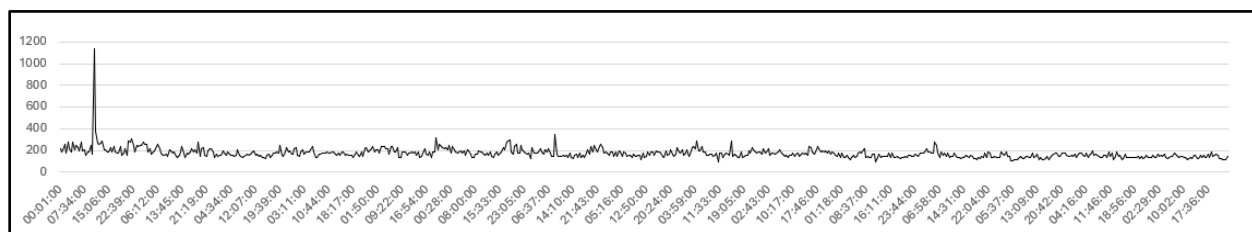


Figura No. 17. Registro de sensor de calidad del aire.

Sin embargo, se procedió luego del periodo de recolección de datos a hacer una última prueba con este sensor para determinar su comportamiento durante la aplicación directa de humo. Con un ahumador de apicultura se procedió a aplicar humo generado a partir de hojas secas de Pino de Hoja Larga (*Pinus palustris*) y frutos secos de Palma Real (*Attalea butyracea*). La idea de la prueba era intercalar la aplicación de humo desde diferentes distancias y concentraciones con mediciones hechas sin aplicar humo. La lectura de las 10:57 fue hecha con humo abundante aplicado directamente en el sensor mientras que las lecturas de las 11:57 y 12:57 fueron hechas con humo abundante aplicado a 3 y 1 metro respectivamente. Se dejaron lecturas intercaladas entre estas lecturas y a partir de la lectura de las 13:28 no se aplicó más humo. Como puede apreciarse, el sensor varió notablemente el resultado de las mediciones luego de la aplicación directa del humo. Esta aparente descalibración de este mismo modelo de sensor ya había sido sugerida por Miskon et al. (2022).

	Lecturas previas a aplicación de humo								Lecturas sin aplicación de humo										
CA	146,59	139,42	182,21	173,80	129,15	150,27	146,59	3 708 550,00	154,02	218,88	61,47	406,96	40,98	34,07	32,80	32,80	45,57	32,80	31,55
Time	7:26	7:56	8:26	8:56	9:26	9:57	10:27	10:57	11:27	11:57	12:27	12:57	13:28	13:58	14:28	14:58	15:28	15:58	16:29
								Humo abundante directo al sensor		Humo 3 mts.		Humo 1 mt.							

Figura No. 18. Resultados de prueba de aplicación de humo al sensor de calidad de aire.

No es el objetivo de este TFG analizar, a partir de los datos recolectados por el prototipo, situaciones específicas de la biología o condiciones de la colmena utilizada; eso está fuera del alcance de esta investigación. Se reitera que este análisis muy preliminar y limitado está hecho con el único objetivo de verificar el funcionamiento operativo del prototipo.

Costo del prototipo

Los costos del prototipo están indicados en la Tabla No. 2. Se muestran la cantidad, descripción y costo de cada uno de los elementos del prototipo. El costo de este prototipo fue de \$126 US dólares. Poca de la literatura consultada para este TFG incluía detalles del costo de construcción del prototipo reportado. Solamente encontramos dos referentes sobre este tema. Primero, Anuar et al. (2019, June) reportaron haber construido un prototipo utilizando una tarjeta microcontrolador esp8266, un sensor temperatura y humedad DTH22 y 4 sensores de carga para medir el peso de la colmena. El costo de este prototipo fue de \$25,11 US dólares (120 MR, Ringgit o dólar malasio). Por su parte, Tashakkori et al. (2021) cuantificaron el costo de su prototipo compuesto por una tarjeta controladora Raspberry, fuente de poder, tarjeta de almacenamiento de información, cámara, micrófono y caja protectora en \$106 US dólares.

Cantidad	Descripción	Costo	Observaciones
1	Tarjeta microcontrolador esp8266 CPU RISC DE 32 BITSS wifi	\$12,00	
5	Sensor Humedad y temperatura DTH22	\$57,50	Costo unitario \$11,50
1	Sensor de calidad de aire MQ135	\$8,50	
1	Sensor de luminosidad y UV LTR390	\$14,00	
1	Tarjeta virgen ensamblaje circuitos	\$7,00	Tarjeta utilizada como “banco de trabajo” para ensamble y pruebas preliminares
1	Adaptador AC 5 voltios	\$8,50	Para energía eléctrica
1	Cable largo datos USB	\$7,00	Para energía eléctrica y carga de programación en el prototipo
1	Caja ensamblaje plástica transparente	\$11,50	Para protección de tarjeta microprocesador entre otros elementos.
Costo total----->		\$126,00	

Tabla No. 2. Costos del prototipo por elemento

V. CONCLUSIONES

En este documento se reportan los resultados de una investigación hecha con el fin de determinar los principales elementos de IoT que puedan ser útiles para el desarrollo de un prototipo de aplicación de esta tecnología, pero adaptada a la realidad de Costa Rica. El objetivo principal de la investigación fue desarrollar dicho prototipo. Respondiendo la pregunta de investigación general, se concluye que el prototipo pudo ser desarrollado utilizando referentes teórico-práctico y la percepción de meliponicultores e investigadores sobre los elementos más relevantes para ser aplicados en la gestión e investigación de este tipo de insectos.

La primera pregunta de investigación específica consistía en determinar los elementos de IoT que son relevantes para ser aplicados en un contexto como el de la meliponicultura en Costa Rica. Para responder esta pregunta de investigación se procedió a investigar los referentes teóricos de la aplicación de IoT en meliponicultura por medio de una revisión sistemática de literatura, con el fin de dar sustento teórico a la investigación. Como resultado se concluye que existe una gran variedad de elementos de IoT que podrían ser utilizados en meliponicultura. Destacan elementos de control y comunicación de datos, y sensores de diversa índole para recolectar variables externas e internas de una colmena. Ejemplos específicos de estos dispositivos de recolección de datos están sensores para medir temperatura, humedad, humo, luminosidad/UV. Otro tipo de dispositivos sirven para capturar localización geográfica y media, específicamente imágenes, video y audio.

La segunda pregunta de investigación específica era determinar las características que debería tener un prototipo de aplicación de IoT para una colmena de abejas sin aguijón. Para responder esta pregunta se procedió a indagar cuales son los principales problemas presentes en la meliponicultura en Costa Rica por medio de un estudio de percepción con meliponicultores e investigadores. Como resultado del resultado de esta indagatoria se llegó a la conclusión que el prototipo por desarrollar debería tener capacidades de autocontrol y comunicación de datos. Adicionalmente, el prototipo tenía que hacer mediciones externas e internas de ciertas variables. En el caso de las variables externas se concluyó que se debía recolectar datos sobre temperatura, humedad, presencia de humo y luminosidad y luz UV. En el caso de las variables internas básicamente se determinó que lo importante era medir la temperatura y humedad. Como parte de

la propuesta a desarrollar, se concluyó que era importante hacer estas mediciones internas en diversas partes de la colmena.

La tercera y última pregunta de investigación específica era establecer que consideraciones de funcionalidad debía tener un prototipo de aplicación de IoT para un contexto como el establecido en la investigación. Para responder esta pregunta se procedió a desarrollar un prototipo de solución de IoT por medio de la implementación en una colmena de sensores y dispositivos de comunicación para recolectar datos de diversas variables externas e internas. Dentro de las consideraciones más importantes se determinó que la disponibilidad de medios de comunicación de datos es un factor crítico. La contingencia presentada con la comunicación de datos en la colmena originalmente propuesta para la prueba se constituyó en un recordatorio de lo fundamental de este tema. Otro aspecto importante que se evaluó fue la protección de los componentes del prototipo. Para esto se pensó inicialmente utilizar la recomendación establecida en la literatura respecto al uso de cinta de teflón (PTFE). No obstante, nuestra investigación concluyó que dicho elemento podría alterar la lectura correcta de los datos. Pero, una vez extraídos los sensores colocados a lo interno de la colmena, fue evidente el avanzado estado de la propolización de los mismos lo que hace pensar que su funcionalidad podría verse comprometida en el corto plazo. Otro aspecto importante fue desarrollar diversas experiencias para determinar la funcionalidad del prototipo utilizando métricas, análisis estadístico específico y pruebas de medición de los diferentes sensores. Finalmente, una consideración muy importante fue determinar el costo del prototipo mismo que resulto relativamente económico.

La principal limitación de esta investigación estuvo relacionada con la falta de recursos. Hubiera sido interesante incorporar más elementos de IoT como los relacionados con el conteo de abejas además de captura de media. No solo eran dispositivos mas caros, sino que la programación necesaria para tal fin demandaba mucho tiempo que no estaba disponible. No obstante, los elementos de IoT efectivamente incorporados y las localizaciones de estos (exterior e interior de la colmena), hacen al prototipo “interesante” como un elemento de referencia para desarrollar propuestas de gestión e investigación en este tipo de abejas utilizando esta tecnología.

VI. RECOMENDACIONES

Tal como se estableció al inicio de esta investigación, la aplicación de IoT en meliponicultura es un campo incipiente que promete tener un enorme potencial de líneas de investigación posibles. Se podría decir que hay múltiples direcciones de enfoque hacia donde se pueden orientar los intereses de aplicación. Control y estudio de plagas, población, relación con servicios ecosistémicos, relación con el ser humano, y un largo etcétera son posibilidades en las cuales se puede aplicar IoT a la meliponicultura. Considerando esto, la principal recomendación de este trabajo es la conformación de equipos multidisciplinarios con profesionales de computación, biología, meliponicultura, apicultura, extensión universitaria y otros similares con el fin de planear y desarrollar estudios longitudinales que permitan incrementar el desarrollo de esta tecnología y su aplicación a la conservación y explotación de este tipo de abejas.

Por otro lado, este trabajo en si se convirtió en una suerte de experiencias en la aplicación de IoT en meliponicultura. Hay muchas cosas que se pueden desarrollar más profundamente a futuro. Por ejemplo, se pueden desarrollar más métricas de medición de la funcionalidad a partir de los datos recolectados por sensores similares a los utilizados en el prototipo desarrollado. En este trabajo se utilizó el punto de rocío, pero existen muchas otras oportunidades de utilización de los datos de los sensores, en relación con situaciones que afectan a las abejas. Otro asunto que resulta interesante es el de explorar alternativas diferentes de posible protección de los sensores que estén ubicados en el interior de una colmena. En este trabajo se descartó el uso de PTFE pero, debido al estado final de los sensores internos, se podría probar con otros materiales como espumas sólidas por ejemplo. En este sentido, la técnica de hacer este tipo de verificación por medio de mediciones y análisis estadístico resultó practica y simple por lo cual se recomienda utilizarla nuevamente.

Finalmente, una recomendación de rigor en este tipo de investigaciones y las que a futuro se desarrollen sobre este tema, es la obligatoria publicación de estos resultados en revistas o congresos científicos de forma tal que el conocimiento sobre esta temática se logre incrementar. En este sentido, hoy más que nunca, el consabido “publica o muere” es de obligatoria consideración.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Abbasi, M., Yaghmaee, M. H. y Rahnama, F. (2019). Internet of Things in agriculture: A survey [Conferencia]. *3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, Isfahan, Iran. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8794645/proceeding>
- Ali, M. C., Ilias, B., Rahim, N. A., Shukor, S. A., Adom, A. H. y Saad, M. A. H. (2021). A Review on the Stingless Beehive Conditions and Parameters Monitoring using IoT and Machine Learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2107 (1). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2107/1/012040/pdf>
- Anuar, N. H. K., Johor, C., Yunus, M. A. M., Baharuddin, M. A., Sahlan, S., Abid, A., Ramli, M. M., Amin, M. R. A., y Lotpi, Z. F. M. (2019, June). Iot platform for precision stingless bee farming. *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, Shah Alam, Malaysia. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8794645/proceeding>
- Anuar, N. H. K., Yunus, M. A. M., Baharudin, M. A., Ibrahim, S., y Sahlan, S. (2021, March). Embedded wireless stingless beehive monitoring and data management system. *2021 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)*, Virtual. <https://icpea2021.uitm.edu.my/>
- Arnold, N., Zepeda, R., Vásquez-Dávila, M. y Aldasoro, M. (2018). *Las abejas sin aguijón y su cultivo en Oaxaca, México*. El Colegio de la Frontera Sur : Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Camargo, J. M. F., Pedro, S. R. M., y Melo, G. A. R. Melo. (2023). *Meliponini Lepeletier, 1836*. Moure. <http://moure.cria.org.br/catalogue?id=117368>.
- Camburn, B., Viswanathan, V., Linsey, J., Anderson, D., Jensen, D., Crawford, R. y Wood, K. (2017). Design prototyping methods: state of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*, 3. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.10>
- Daoliang, L. y Hao, Y. (2018). State-of-the-art review for internet of things in agriculture. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 1, 1-22.
- Discover Life. (2023). *Heterotrigona Itama*. <https://www.discoverlife.org/mp/20q>

- Guimarães-Cestaro, L., Martins, M. F., Martínez, L. C., Alves, M. L. T. M. F., Guidugli-Lazzarini, K. R., Nocelli, R. C. F., ... & Teixeira, É. W. (2020). Occurrence of virus, microsporidia, and pesticide residues in three species of stingless bees (Apidae: Meliponini) in the field. *The Science of Nature*, 107, 1-14.
- Halim, L. A., Basrawi, M. F., Yusof, T. M., Yusof, M. H., Mustafa, Z., y Ibrahim, T. K. (2020, May). A preliminary study on new cooling techniques for stingless bees hive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863(1), 012040.
- Herrera G., E. y Aguilar-Monge, I. (2019). *Las abejas sin aguijón de La Cuenca del Río Jesús María y Río Barranca*. Costa Rica. Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales (CINAT), UNA.
- Hrcir, M., Karau, S. y Barth, F. (2016). Stingless bees (Meliponini): senses and behavior. *Journal of Comparative Physiology A.*, 202:597–601.
- Kontogiannis, S. (2019). An internet of things-based low-power integrated beekeeping safety and conditions monitoring system. *Inventions*, 4(3), 52.
- Kour, V. P. y Arora, S. (2020). Recent developments of the internet of things in agriculture: a survey. *Ieee Access*, 8, 129924-129957.
- Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225-234.
- Madakam, S., Lake, V., Lake, V. y Lake, V. (2015). Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 3(05), 164.
- Mahamud, M. S., Al Rakib, M. A., Faruqi, T. M., Haque, M., Rukaia, S. A. y Nazmi, S. (2019). Mouchak-An IoT Basted Smart Beekeeping System Using MQTT. *2019 4th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*. Singapore. <http://www.icrae.org/2019.html>
- Man, M., Bakar, W. A. W. A. y Razak, M. A. B. A. (2020). MUS-Tracker: An IoT based system in controlling and monitoring of beehives. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(6).

- May-Itzá, W. d. J., Martínez-Fortún, S., Zaragoza-Trello, C. y Ruiz, C. (2022). Stingless bees in tropical dry forests: global context and challenges of an integrated conservation management. *Journal of Apicultural Research*, 61(5), 642–653. <https://doi.org/10.1080/00218839.2022.2095709>
- Miskon, M. T., Razak, M. A. A., Jaafar, H., Hassan, N., y Mahmood, R. (2022). A Lora-based Testbed Development for Stingless Bee Monitoring System. *TEM Journal*, 11(2), 712-718. https://www.temjournal.com/content/112/TEMJournalMay2022_712_718.html
- Mora, J., Aguilar I., Morera, C., Guevara, M. y Alfaro, L. D. (2021). Distribución espacial de las abejas meliponas (Hymenoptera: Apidae: Meliponini) en el Corredor Biológico Montes del Aguacate, Costa Rica. *Revista chilena de entomología*, 47(3), 479-487.
- Nordin, A., Sainik, N. Q. A. V., Chowdhury, S. R., Saim, A. B., y Idrus, R. B. H. (2018). Physicochemical properties of stingless bee honey from around the globe: A comprehensive review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 73, 91-102.
- Ochoa, I. Z., Gutiérrez, S. y Rodríguez, F. (2019). Internet of things: Low cost monitoring beehive system using wireless sensor network. *2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*, Boca del Rio, México. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8920666>
- Przybyłek, I., y Karpiński, T. M. (2019). Antibacterial properties of propolis. *Molecules*, 24(11), 2047.
- Ramírez, M. (2021). *Especies botánicas de importancia alimenticia para la abeja nativa Melipona beecheii, en la zona de Atenas, Alajuela, Costa Rica*. [Trabajo Final de Graduación para optar un grado de Maestría en Apicultura Tropical, Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales (CINAT), Universidad Nacional]. <https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/22218/MAT%20Marianyela%20Ram%C3%ADrez%20M.pdf?sequence=1>
- Ritchie, S. M., Young, L. M. y Sigman, J. (2018). A comparison of selected bibliographic database subject overlap for agricultural information. *Issues in Science and Technology Librarianship*, Spring 2018, 89.
- Rose, K., Eldridge, S. y Chapin, L. (2015). The internet of things: an overview. *The internet society (ISOC)*, 80, 1-50

- Tashakkori, R., Hamza, A. S., y Crawford, M. B. (2021). Beemon: An IoT-based beehive monitoring system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106427.
- Williamson, K. y Johanson, G. (2018). *Research methods: Information, systems, and context*. Chandos Publishing.
- Yunus, M. A. M., Ibrahim, S., Kaman, K. K., Anuar, N. H. K., Othman, N., Majid, M. A., Muhamad, N. A. (2017). Internet of Things (IoT) Application in Meliponiculture. *International Journal of Integrated Engineering*, 9(4), 57-63
- Yuwei, W. (2019). *Heterotrigona itama - Stingless Bee*. Wiki.nus. <https://wiki.nus.edu.sg/display/TAX/Heterotrigona+itama+-+Stingless+Bee>
- Živkov-Baloš, M., Popov, N., Vidaković, S., Ljubojević-Pelić, D., Pelić, M., Mihaljev, Ž. y Jakšić, S. (2018). Electrical Conductivity and Acidity of Honey. *Arhiv veterinarske medicine*, 11(1), 91 – 101.

VIII. APENDICES

Apéndice 1, Componentes de IoT localizados en la literatura consultada

Finalidad	Componente	Observaciones
Control	<ul style="list-style-type: none"> • Microcontrolador Arduino (Miskon et al., 2022; Yunus et al., 2017) • NodeMCU ESP8266 (Anuar et al., 2019, June) 	
Almacenamiento y/o transmisión de datos	<ul style="list-style-type: none"> • RFM95W LoRa (Miskon et al., 2022) • ThingSpeaks Internet of Things (Ali et al., 2021) • Raspberry Pi (Rpi) (Tashakkori et al., 2021) 	<ul style="list-style-type: none"> • RFM95W LoRa utilizado para transmitir datos. • ThingSpeaks Internet of Things utilizado para recopilar datos. • Raspberry Pi (Rpi), además de ser utilizada como CPU permite almacenar datos).
Potencia	<ul style="list-style-type: none"> • MT3608 con modo de corriente SOT23 de 6 pines (Anuar et al., 2019, June) • Batería de 3.7V 18650 3000mAh (Anuar et al., 2019, June) • Panel solar portátil USB de 5 W 5 V (Anuar et al., 2019, June) 	<ul style="list-style-type: none"> • MT3608 utilizado como convertidor elevador para aplicaciones pequeñas de baja potencia • Panel solar usado para recolectar energía para las baterías como respaldo.
Medir temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor DHT11 (Ali et al., 2021; Yunus et al., 2017; Anuar et al., 2019, June) • Sensor DHT22 (Miskon et al., 2022; Anuar et al., 2019, June). • GPIO built-in 40-pin (Tashakkori et al., 2021) 	<ul style="list-style-type: none"> • Halim et al.(2020, May) utilizó uno en cámara de cría y otro en alza de miel. • Los sensores envueltos en cinta politetrafluoroetileno (PTFE), más conocido como teflón, evita que el propóleo interfiriera con la lectura. (Ali et al., 2021). • Junto con sensor de humedad permiten calcular el punto de rocío. (Anuar et al., 2021, March) • Anuar et al.(2019, June) lo utilizó también para medir en el exterior de la colmena.
Medir humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor DHT11 (Anuar et al., 2019, June) • Sensor DHT22 (Miskon et al., 2022; Anuar et al., 2019, June) 	<ul style="list-style-type: none"> • Junto con sensor de temperatura permite calcular el punto de rocío. (Anuar et al., 2021, March). • El PTFE permite que el vapor de agua pase de un lado a otro mientras protege el sensor de la cera de abeja o el propóleo).(Yunus et al., 2017)

	<ul style="list-style-type: none"> • GPIO built-in 40-pin (Tashakkori et al., 2021) 	<ul style="list-style-type: none"> • Anuar et al.(2019, June) lo utilizó también para medir en el exterior de la colmena.
Medir peso	<ul style="list-style-type: none"> • Celda de carga (Miskon et al., 2022) • SGLC ("Strain Gauge Load Cell") integradas con un módulo HX711 (Anuar et al., 2019, June; Anuar et al., 2021, March) 	<ul style="list-style-type: none"> • Celda de carga utilizada como balanza digital. • SGLC utilizado para medir el peso de los contenedores de miel
Medir calidad del aire	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de humo MQ135 (Miskon et al., 2022) 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para monitorear la calidad del aire ambiental
Captura de media	<ul style="list-style-type: none"> • Rpi Camera V3 • USB microphone (Tashakkori et al., 2021) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara utilizada para captura de imagen y video • Micrófono utilizado para registro de audio
Emisión de infrarrojo	<ul style="list-style-type: none"> • Emisor de infrarrojos SFH 4550 y receptor fototransistor IR SFH 309 (Anuar et al., 2021, March) • Transmisores de luz infrarroja (LED) y receptores (fotodiodos) (Yunus et al., 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizados para estimar el número de abejas que entran y salen de la colmena
Alarma	<ul style="list-style-type: none"> • Unidad de zumbador (Anuar et al., 2019, June) 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para alertar sobre la presencia de ladrones
Localización	<ul style="list-style-type: none"> • GPS GY NEO6MV2 (Anuar et al., 2019, June) 	<ul style="list-style-type: none"> • Usado como un potente receptor GPS de bajo costo

Apéndice 2, Consideraciones prácticas de técnicas de investigación utilizadas.

Técnica	Consideraciones practicas
Revisión de Literatura	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona antecedentes, un marco y un contexto para un estudio. • Indica las relaciones con otros estudios. • Ayuda a comprender el problema y su contexto. • Permite identificar las lagunas en investigaciones anteriores. • Posibilita justificar un estudio propuesto en relación con una necesidad demostrada (Williamson y Johanson, 2018).
Encuesta	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la recolección de datos primarios de toda o parte de una población. • Permite determinar la incidencia, distribución e interrelaciones de ciertas variables dentro de la población en estudio. • Posibilita recopilar datos que describen y explican las características, comportamientos, actitudes u opiniones de la población o de la muestra. • Utiliza diversos medios de recolección de información (cuestionarios, entrevistas, observación) • Tiene retos importantes (muestreo y definición de instrumento de recolección de datos.) (Williamson y Johanson, 2018).
Prototipado	<ul style="list-style-type: none"> • Está enmarcada dentro de la ciencia del diseño. • Su principal objetivo es mejorar el rendimiento y la experiencia del usuario de un potencial diseño final • Es una técnica omnipresente en el desarrollo de productos, servicios y sistemas innovadores. • Ayuda en la creación de ideas como un medio para aumentar el porcentaje de ideas funcionales. • Es un proceso rápido. (Camburn et al., 2017).

Apéndice 3, Listado de literatura resultante de la revisión de literatura.

Título	Clave
A Lora-based Testbed Development for Stingless Bee Monitoring System	Miskon et al., 2022
A preliminary study on new cooling techniques for stingless bees hive	Halim et al., 2020, May
A Review on the Stingless Beehive Conditions and Parameters Monitoring using IoT and Machine Learning	Ali et al., 2021
Beemon: An IoT-Based Beehive Monitoring System	Tashakkori et al., 2021
Embedded Wireless Stingless Beehive Monitoring And Data Management System	Anuar et al., 2021, March
Internet of Things (IoT) Application in Meliponiculture	Yunus et al., 2017
IoT Platform for Precision Stingless Bee Farming	Anuar et al., 2019, June
MUS-Tracker: An IoT Based System in Controlling and Monitoring of Beehives	Man et al., 2020

Nota: En este apéndice se indica la clave de codificación de cita en el texto de cada elemento de literatura. En la bibliografía se utiliza la misma clave y la referencia bibliográfica completa de cada documento

Apéndice 4, Formulario de encuesta utilizado

Aspectos Importantes para la Meliponicultura

Hola, mi nombre es Fulvio Lizano Madriz y me encuentro cursando la Maestría en Apicultura Tropical (MAT) en el Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales (CINAT) de la Universidad Nacional. Como proyecto final de graduación me encuentro desarrollando una investigación titulada "Aplicación de Internet de las Cosas en Meliponicultura: Prototipo de Colmena Inteligente para Meliponicultura (CIM)". El objetivo general de esta investigación es desarrollar un prototipo de aplicación de Internet de las Cosas (IoT) utilizando referentes teórico-práctico y la percepción de los problemas actuales de la meliponicultura con el fin de adaptar la aplicación de esta tecnología al contexto de la meliponicultura en Costa Rica. Como parte del proceso de investigación, nos interesa mucho conocer su opinión como meliponicultora(or) (ya sea que tenga actualmente colmenas o que haya tenido en el pasado) o como investigadora(or), sobre algunos aspectos puntuales de la realidad de la meliponicultura.

Por esta razón le estamos solicitando su valiosa colaboración llenando esta encuesta de forma completamente anónima, comprometiéndome desde ya a enviarle los resultados de la investigación cuando esta este concluida.

La encuesta es pequeña y fácil de llenar. Inicia con algunos datos demográficos que son necesarios para contextualizar las opiniones en general, luego algunas preguntas específicas sobre necesidades de la meliponicultura finalizando con unas preguntas abiertas para permitirle ampliar en sus propias palabras las opiniones brindadas. Si tiene alguna consulta sobre la misma, no dude en contactarme al teléfono (+506) 85939602 o al email flizano@una.cr

Del mismo modo, si desea ayuda llenando la encuesta, es decir, si desea responder por medio de una llamada telefónica que le haga yo, con mucho gusto lo podemos hacer. Solamente necesito que Ud. me lo indique y lo coordinamos en una fecha y hora en la cual Ud. pueda.

* Indicates required question

Información general

Por favor, a continuación se le solicita alguna información de índole demográfica que no será divulgada de ninguna manera y que solamente será utilizada para contextualizar y caracterizar el origen de los datos recopilados en esta encuesta.

1. Edad *

Mark only one oval.

- 25 años o menos
- 25 a 35 años
- 35 a 50 años
- Mas de 50 años

2. Género *

Mark only one oval.

- Femenino
- Masculino
- Prefiero no decirlo

3. Lugar donde desarrolla su actividad *

Mark only one oval.

- San José
- Alajuela
- Cartago
- Heredia
- Guanacaste
- Puntarenas
- Limon
- Para participantes fuera de Costa Rica

4. Actividad *

Mark only one oval.

- Meliponicultora(or)
- Investigadora(or)

5. Años de experiencia en meliponicultura (producción/investigación) *

Mark only one oval.

- Menos de 5 años
- 5 a 15 años
- 15 a 25 años
- Mas de 25 años

6. Medio de comunicación (favor proporcionar un numero de teléfono celular o un correo electrónico para hacerle llegar el resultado de esta investigación. Si no desea tener esos resultados no conteste esta pregunta)

Aspectos importantes para la meliponicultura

Por favor, a continuación se le presentan algunos aspectos sobre los cuales se le solicita su opinión sobre la importancia de cada uno de ellos para la meliponicultura. Su opinión se expresa seleccionando la alternativa que represente su grado de opinión desde menos importante (codificado como 1) hasta muy importante (codificado como 5)

7. Conocer la temperatura interna de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

8. Conocer la temperatura externa de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

9. Conocer la humedad interna de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

10. Conocer la humedad ambiental de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

11. Conocer el peso de las reservas de miel de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

12. Conocer la calidad del aire alrededor de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

13. Conocer la cantidad de abejas que contiene la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

14. Rastrear la ubicación de la colmena en caso de robo *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

15. Controlar el movimiento o vibración de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

16. Conocer el nivel de la colmena (nivel horizontal) *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

17. Conocer la luminosidad externa de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

18. Conocer el sonido interno de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

19. Conocer el sonido externo de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

20. Tener acceso a video/imagen interno de la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

21. Tener acceso a video/imagen externo a la colmena *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

Men Muy importante

Extender opinión.

Por favor, a continuación se le ruega ampliar su opinión dada en la sección anterior. Le rogamos seleccionar 3 de los aspectos citados en la anterior sección, e indicarnos porque Ud. considera que son importantes para la meliponicultura desde su perspectiva en producción o investigación.

22. Aspecto 1 (Favor indicar al inicio de su respuesta cual es el aspecto al cual Ud. se referirá)

23. Aspecto 2 (Favor indicar al inicio de su respuesta cual es el aspecto al cual Ud. se referirá)
